



**Compréhension des paramètres de produit et de procédé  
de fabrication des tissus 3D interlocks chaines.  
Applications en tant que renfort fibreux de solutions de  
protection à l'impact.**

François Boussu

► **To cite this version:**

François Boussu. Compréhension des paramètres de produit et de procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines. Applications en tant que renfort fibreux de solutions de protection à l'impact.. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. l'Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, 2014. tel-01338493

**HAL Id: tel-01338493**

**<https://theses.hal.science/tel-01338493>**

Submitted on 28 Jun 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives| 4.0  
International License



Habilitation à Diriger des Recherches  
de l'Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS  
en Mécanique des matériaux

Présentée et soutenue par François BOUSSU (n° ordre : 14/04)  
Le 07/11/2014, à Roubaix (ENSAIT)

École doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)  
Équipes de recherche : Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH),  
Génie et Matériaux TEXTiles (GEMTEX)

Compréhension des paramètres de produit et de procédé de fabrication des tissus  
3D interlocks chaines.

Applications en tant que renfort fibreux de solutions de protection à l'impact.

## JURY

### *Rapporteurs :*

**Chokri CHERIFF**, Professeur, Université de Dresde, Allemagne.

**Jean-Yves DREAN**, Professeur, Université de Haute Alsace, Mulhouse, France.

**Jean-François FERRERO**, Professeur, Université Paul Sabatier de Toulouse, France.

### *Examineurs :*

**Emmanuelle VIDAL-SALLE**, Professeure, INSA Lyon, France.

**Hakim NACEUR**, Professeur, ENSIAME LAMIH UMR CNRS, Valenciennes, France.

Cette présentation est proposée par :

**Daniel COUTELLIER**, Professeur, ENSIAME LAMIH UMR CNRS, Valenciennes, France.

**Vladan KONCAR**, Professeur, ENSAIT, Roubaix, France.

**Damien SOULAT**, Professeur, ENSAIT, Roubaix, France.



Université  
de Valenciennes  
et du Hainaut-Cambresis



# Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont aidé à réaliser l'ensemble de ces travaux de recherche aux cours de toutes ces années.

Je commencerai avant tout par ma formidable épouse (Virginie), et nos 5 merveilleux enfants réunis (Rémi, Amandine, Valentine, Gabin et Clémentine) pour m'avoir apporté tout leur amour, leur soutien et surtout pour m'avoir supporté durant toutes ces années, ponctuées de succès et d'échecs. Une attention toute particulière également à mes parents (Nicole et Jean) pour m'avoir donné, entre autres, les bases nécessaires à la lecture et l'écriture, me permettant de rédiger ce manuscrit. Également, mes beaux-parents (Brigitte et Yves), qui nous ont soutenu et accueilli en tant que famille recomposée.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury et plus particulièrement les rapporteurs et examinateurs, ainsi que les membres invités.

Je tiens à remercier l'ensemble de mes collègues qui ont contribué par leur implication dans la participation et le suivi de ces travaux de recherche.

Vladan Koncar, pour son aide précieuse, son soutien tout au long de ses années, et notamment son encadrement des quatre thèses de doctorat de Jalloul Elfheri, Christophe Nocito, Saad Nauman et Nicolas Trifigny.

Daniel Coutellier, pour son aide et sa disponibilité dans l'encadrement des trois thèses de doctorat de Marie Lefebvre, Benjamin Provost et Caroline Chevalier.

Abdellatif Imad, pour son aide dans l'encadrement des deux thèses de doctorat de Cuong Ha-Minh et Jan Van Roey.

Philippe Boisse, pour son aide dans l'encadrement de la thèse de doctorat de Jérôme Vilfayeau.

Damien Soulat, pour sa disponibilité et son aide dans l'encadrement de la thèse en cours de Clément Dufour.

Christophe Binetruy, pour son aide dans les différents projets de recherche et notamment son encadrement de la thèse de Patrick Lapeyronnie.

Jean-Jacques Denimal, pour son expertise de statisticien lors des travaux de recherche et au cours de la réalisation du logiciel Textile Analysis.

Toufik Kanit, pour son expertise de numéricien lors de la thèse de doctorat de Cuong Ha-Minh.

David Crépin, pour son expertise de numéricien lors de la thèse de doctorat de Jérôme Vilfayeau.

Cédric Cochrane, pour son expertise d'automaticien lors de la thèse de doctorat de Nicolas Trifigny.

Irina Cristian, pour son expertise en tissage lors de la thèse de doctorat de Saad Nauman.

Xavier Legrand, pour son expertise de mécanicien lors des différents projets de recherche sur les procédés de fabrication.

Pascal Bruniaux, pour son expertise d'automaticien lors des travaux de recherche sur une solution textile de protection souple.

Peng Wang, pour son expertise de numéricien dans le suivi de la thèse en cours de Clément Dufour.

Christophe Kerisit, pour son expertise de numéricien dans le suivi de la thèse en cours de Caroline Chevalier.

Xavier Flambard, pour son expertise dans le domaine de la protection souple et pour son soutien dans mes activités de recherche.

Je tiens à remercier également l'ensemble des docteurs (lors de leur thèse de doctorat en co-encadrement) pour leurs travaux de recherche et les résultats obtenus, notamment : Christophe Nocito, Jalloul Elfheri, Saad Nauman, Cuong Ha-Minh, Marie Lefebvre, Jan Van Roey, Benjamin Provost, Nicolas Trifigny, Jérôme Vilfayeau.

Je tiens à encourager les doctorants en cours de thèse, Clément Dufour et Caroline Chevalier, pour leur implication et leurs apports dans les travaux de recherche.

Sans oublier l'ensemble des docteurs (lors de leur thèse de doctorat en collaboration) : Patrick Lapeyronnie, Amélie Kolopp, Charlotte Florimond; pour leurs apports et leurs encadrants respectifs : Christophe Binetruy, Christophe Bouvet et Emmanuelle Vidal-Sallé.

Je tiens à remercier les ingénieurs et techniciens de l'équipe tissage, et autres ateliers de l'ENSAIT, pour leur aide dans la production des structures tissées et la conception des machines à tisser de prototypage, tels que : Frédéric Veyet, Nicolas Dumont, Tomasz Kromoska, Marcel Gevaert, Ali Naab. Sans oublier les personnes de l'ENSAIT qui m'ont aidé dans le montage des différents projets de recherche : Bertrand Meyer, Christian Amos, Franck Clemmersseune, Carole Magniez, Moïse Vouters, Virginie Braem.

Sans oublier les personnes impliquées dans les différents contrats de recherche qui ont contribué à ses résultats : Julien Nussbaum (ISL), François Barthélémy (DGA), Karine Thorat-Pierre (CEDREM), Mickael Lequin (CEDREM), Fabien Rondot (ISL), Philippe Poulin (CNRS), Daniel Vallée (NEXTER), Eric Petitpas (NEXTER), Jonathan Pariente (RTD), Sébastien Lemerrier (RTD), Jérôme Laget (OSEO), Florent Bouillon (AIRCELLE), Julien Bardy (AIRCELLE), Michel Rognant (AIRCELLE), Bertrand Desjoyeaux (AIRCELLE), et l'ensemble des membres des projets ANR NUMTISS, FP7 MAPICC 3D, REI SAFE et SNCTEX, OSEO BALI, DGA MAPRE.

# Table des matières

Remerciements .....	2
Table des matières .....	3
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux .....	11
Introduction Générale .....	12
Thème 1. Classification et paramétrage des tissus 3D interlocks chaines .....	14
Sommaire .....	14
I. Introduction.....	15
II. Définition d'un tissu 3D interlock chaîne .....	15
A. Représentation générale des tissus 2D .....	15
B. Représentation générale des tissus 3D interlock chaîne.....	16
III. Classification des tissus 3D interlocks chaines .....	17
A. Classification actuelle des tissus 3D interlocks chaines.....	17
B. Amélioration de la classification actuelle des tissus 3D interlocks chaines .....	20
C. Conclusion sur la classification des tissus 3D interlocks chaines .....	22
IV. Paramétrage des tissus 3D interlocks chaines .....	22
A. Influence des paramètres de procédé de fabrication.....	22
1. Positionnement des fils de chaîne dans le peigne de la machine à tisser des tissus 3D interlocks chaines .....	22
2. Ordre de sélection des fils de chaîne et trame des tissus 3D interlocks chaines .....	24
B. Influence des paramètres de produit .....	26
1. Densité des fils de chaîne des tissus 3D interlocks chaines .....	26
2. Architecture des tissus 3D interlocks chaines.....	27
3. Pas et profondeur de liage de l'architecture des tissus 3D interlocks chaines .....	30
C. Influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication.....	34
1. Observation de la section géométrique des fils de chaîne au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne.....	35
2. Observation de la section géométrique des fils de trame au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne .....	36
D. Conclusion sur l'influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines.....	39
V. Synthèse.....	39
VI. Bibliographie.....	39
Thème 2. Propriétés et mise en forme des tissus 3D interlocks chaines .....	42
Sommaire .....	42
I. Introduction.....	43
II. Avantages et inconvénients des tissus 3D interlocks chaines en termes de paramètres produit et procédé de fabrication .....	43
A. Avantages des tissus 3D interlocks chaines .....	43
B. Inconvénients des tissus 3D interlocks chaines .....	43
III. Propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines .....	44
A. Avantages en termes de propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines .....	44
1. Résistance au délaminage.....	44
2. Résistance à l'impact.....	45
B. Inconvénients en termes de propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines.....	46
C. Mesure in-situ lors de la caractérisation d'un tissu 3D interlock chaîne résiné .....	47
D. Conclusion sur les propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines .....	48
IV. Pliage et mise en forme des tissus 3D interlocks chaines .....	48
A. Pliage dans l'épaisseur d'un tissu 3D interlock chaîne .....	49
B. Mise en forme d'un tissu 3D interlock chaîne dans la direction de l'épaisseur.....	52
C. Mise en forme symétrique du tissu 3D interlock chaîne.....	52
1. Mesure de la variation d'épaisseur .....	53
2. Mesure de l'avalement dans les deux directions du tissu .....	54
3. Mesure du glissement entre les couches externes du tissu 3D interlock chaîne .....	54
4. Mesure des valeurs d'angle de cisaillement entre les fils de chaîne et trame .....	55
5. Comparaison des valeurs de mesures effectuées sur les tissus 3D interlocks chaines déformés .....	55
D. Mise en forme asymétrique du tissu 3D interlock chaîne .....	56
E. Conclusion sur la mise en forme des tissus 3D interlocks chaines .....	58
V. Synthèse.....	58
VI. Bibliographie.....	58
Thème 3. Analyse et optimisation du procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines .....	62
Sommaire .....	62
I. Introduction.....	63
II. Observation et analyse du procédé de fabrication .....	63



A.	Observation de la cinématique du procédé de tissage .....	63
B.	Observation de la dynamique du procédé de tissage .....	64
1.	Mesure visuelle de la dynamique du procédé de tissage .....	64
2.	Mesure des sollicitations dynamiques in-situ par fils capteurs proches des lamelles casse-chaines.....	65
3.	Mesure des sollicitations dynamiques in-situ par fils capteurs proches des lisses.....	66
C.	Analyse du procédé de fabrication par simulation .....	66
1.	Modèles utilisés pour le fil et les éléments de la machine à tisser .....	66
2.	Simulation des étapes de la formation d'un tissu .....	67
3.	Simulation de la formation d'un tissu 2D d'armure toile à base de fils de 300 Tex [1] .....	68
4.	Simulation de la formation d'un tissu 2D d'armure croisé 2-2 à base de fils de 300 Tex [1] .....	69
D.	Conclusion sur l'observation et l'analyse du procédé de fabrication .....	70
III.	Optimisation du procédé de tissage adapté aux tissus 3D interlocks chaines.....	71
A.	Optimisation sur une machine à tisser industrielle .....	71
B.	Conception d'une machine à tisser de prototypage optimisée pour les tissus 3D interlocks chaines à base de fils autres que carbone .....	74
C.	Conception d'une machine à tisser de prototypage optimisée pour les tissus 3D interlocks chaines à base de fils carbonés .....	75
D.	Conclusion sur l'optimisation du procédé de fabrication adapté aux tissus 3D interlocks chaines .....	76
IV.	Endommagement matière au cours du tissage 3D interlock chaîne.....	76
A.	Analyse de l'endommagement des fils lors du procédé de tissage .....	77
B.	Analyse de l'endommagement des fils sur machine à tisser industrielle.....	78
C.	Analyse des endommagements des fils sur machine à tisser de prototypage .....	79
1.	Optimisation de la valeur de torsion (tours/m) des fils de para-aramide Kevlar-29 (3300 dTex).....	79
2.	Mesure de la dégradation des fils lors de la fabrication du tissu 3D interlock chaîne.....	80
D.	Conclusion sur l'étude de l'endommagement matière au cours du tissage 3D interlock chaîne.....	81
V.	Synthèse.....	82
VI.	Bibliographie.....	82
	Thème 4. Comportement à l'impact des structures textiles souples .....	86
	Sommaire .....	86
I.	Introduction.....	87
II.	Modèle de comportement à l'impact d'un tissu souple .....	87
A.	Caractérisation dynamique d'un fil .....	88
B.	Paramètres influents sur le comportement à l'impact d'un tissu .....	90
1.	Influence de la vitesse d'impact.....	90
2.	Influence de la géométrie du projectile.....	90
3.	Influence de l'angle d'impact du projectile sur la cible .....	91
4.	Influence de la géométrie du tissu .....	91
5.	Influence du mode de fixation du tissu.....	91
C.	Description du comportement dynamique d'un tissu à l'impact .....	92
D.	Influence des caractéristiques mécaniques du fil lors d'un impact balistique.....	95
1.	Influence du coefficient de Poisson $\nu_{12}$ .....	96
2.	Influence module d'Young transversal $E_{22}$ .....	97
3.	Influence du module de cisaillement $G_{12}$ .....	98
4.	Influence du frottement des fils.....	98
5.	Influence de la géométrie du tissu .....	99
E.	Études expérimentales sur le comportement à l'impact de tissu 3D interlock chaîne .....	100
F.	Conclusion sur le modèle du comportement à l'impact.....	106
III.	Solutions de protection souple à l'impact .....	107
A.	Gilet pare balles intégrant des fils à mémoire de forme .....	107
B.	Gilet pare balles intégrant des hybridations de structures textiles.....	108
C.	Gilet pare-balles adapté à la morphologie féminine.....	110
D.	Conclusion sur les solutions de protection souple à l'impact.....	111
IV.	Synthèse.....	112
V.	Bibliographie.....	112
	Thème 5. Comportement à l'impact des structures textiles composites.....	118
	Sommaire .....	118
I.	Introduction.....	119
II.	Comportement à l'impact d'un renfort fibreux au sein d'une structure composite .....	119
A.	Description du phénomène d'impact sur structure composite.....	119
B.	Comportement à l'impact des tissus 3D interlocks chaines .....	120
III.	Solutions de protection dure à l'impact .....	121
A.	Les structures textiles composites utilisées seules, de renfort fibreux imprégné de résine époxy et à base d'UD de polyéthylène à haut module, soumises à l'impact d'une munition perforante de type 7,62 × 51 mm AP WC (type AP8) (8,21 g) à 930 m/s.....	121
B.	Les structures textiles composites couplées à des matériaux métalliques ou céramiques pour former des solutions de protection dure .....	124
1.	Solution de protection composée de matériaux céramique et composite, de renfort fibreux imprégné de résine polyéthylène basse densité et à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant des fils polyéthylènes haut module (Spectra 900), soumise à l'impact d'une munition perforante de type 12,7 mm (43g) à 610 m/s .....	125

2. Solution de protection composée de matériaux métallique et composite, de renfort fibreux résiné époxy à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant soit des fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex) ou soit des fils polyester aromatique Vectran (2×1650 dTex), soumise à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 630 m/s. ....	126
3. Solution de protection composée de matériaux métallique et composite, de renfort fibreux imprégné de résine thermoplastique à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant des fils para-aramide et des fils polyéthylène basse densité, soumise à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54g) à 1600 m/s .....	130
C. Conclusion sur les solutions de protection dure à l'impact .....	137
IV. Synthèse.....	137
V. Bibliographie.....	137
Conclusion Générale.....	141
Perspectives .....	144
Carrière universitaire et professionnelle.....	146
Sommaire .....	146
I. Introduction.....	146
II. Thématiques de recherche sur la période 1995 à fin 2005 .....	146
A. Synthèse des travaux lors de ma thèse de doctorat.....	146
B. Synthèse des travaux suite à ma thèse de doctorat .....	147
III. Thématiques de recherche sur la période début 2006 à 2014.....	148
A. Innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications sur les tissus 3D interlocks chaînes .....	149
B. Innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaînes .....	150
IV. Bilan général de la valorisation scientifique .....	150
V. Bibliographie.....	152
Curriculum Vitae .....	161
VI. Bibliographie.....	168
Annexe 1. Liste détaillée des projets de fin d'études (ingénieur/master) pendant la période 1998 - 2013.....	170
Résumé.....	172
Mots clés : .....	172
Abstract.....	173
Key words : .....	173

# Liste des figures

Figure 1. Mode d'observation d'un tissu dans un repère (X, Y, Z).	15
Figure 2. (haut-gauche) Observation selon une direction normale au plan du tissu - représentations géométriques 2D (haut-droite) et 3D (bas-gauche)- représentation du codage numérique équivalent (bas-droite).	16
Figure 3. Représentation géométrique d'un tissu multi-couches lié dans l'épaisseur par les fils de chaîne.	16
Figure 4. Représentation schématisée par une vue en coupe des fils de trame d'une structure tissée 3D interlock chaîne.	17
Figure 5. Les 4 classes de tissus 3D interlocks chaînes selon la classification de Hu [24].	18
Figure 6. Définition des architectures interlocks en fonction du nombre de couches, du pas et de la profondeur de liage.	18
Figure 7. Représentation des 4 classes d'interlocks complétées des paramètres de liage.	19
Figure 8. Numérotation des fils de chaîne et trame dans une armure de tissu 3D interlock chaîne : (a) Vue globale du type liage 3D; (b) Numérotation des fils de trame en coupe et des fils de chaîne de liage et renfort dans la représentation du liage 3D.	19
Figure 9. Représentation des différents groupes d'évolutions de fils de chaîne au sein d'une structure tissée 3D interlock chaîne.	20
Figure 10. Représentation d'un tissu 3D interlock chaîne à consommation constante en longueur des fils de chaîne.	20
Figure 11. Représentation d'un tissu 3D interlock chaîne à consommation non constante en longueur des fils de chaîne.	21
Figure 12. Représentation en coupe des fils de trame du tissu 3D interlock chaîne à 4 couches type interlock A - Liage T [36].	21
Figure 13. Images en coupe des fils de chaîne dans le sens des fils de trame des 3 tissus 3D interlocks chaînes.	24
Figure 14. Représentation tissu Interlock O -L liage 1-2-7 avec des fils de chaîne de surface en insertion des fils de trame de type "U" (gauche) et en vue 3D dans l'ordre de sélection des fils de chaîne (droite).	25
Figure 15. Représentation du tissu Interlock O -L liage 1-2-7 avec insertion des fils de trame de type "N" inversé (gauche) et en vue 3D dans l'ordre de sélection des fils de chaîne (droite).	25
Figure 16. Vue en coupe de la section des tissus Interlock O - Liage L 1-2-7 (gauche) avec des fils de chaîne de surface et une insertion des fils de trame de type "U" et (droite) sans fils de chaîne de surface et une insertion des fils de trame de type "N" inversé.	25
Figure 17. Représentation des vues en coupe des fils de chaîne (sur le côté droit de l'image du tissu) et trame (en bas de l'image du tissu) des tissus Interlock O -Liage L 1-2-7 avec 18 fils chaînes/cm - 80 fils trames/cm (gauche) et 30 fils chaînes/cm - 56 fils trames/cm (droite).	26
Figure 18. Représentation des vues en coupe des fils de chaîne (sur le côté droit de l'image du tissu) et trame (en bas de l'image du tissu) des tissus Interlock O -Liage L 1-2-7 avec 42 fils chaînes/cm - 42 fils trames/cm (gauche) et 60 fils chaînes/cm - 37 fils trames/cm (droite).	26
Figure 19. Images tomographiques du tissu Interlock O - Liage T 1-4-4 avec fils de renforts (base armure toile).	27
Figure 20. Images tomographiques du tissu Interlock O - Liage T 2-4-4 avec fils de renforts (base armure croisé 2-2).	28
Figure 21. Images tomographiques du tissu Interlock A - Liage T 7-4-4 avec fils de renfort (base armure satin 8).	29
Figure 22. Évolutions successives de la section d'un même fil de trame localisé à trois positions différentes en fonction des vues en coupe de la structure tissée 3D interlock chaîne.	29
Figure 23. Images tomographiques en coupe des fils de trame du tissu Interlock A - Liage T 5-5-5 (gauche) et Liage L 3-3-5 (droite).	31
Figure 24. Courbes de traction-allongement dans les sens chaîne et trame pour les trois types de liage du tissu interlock d'angle.	32
Figure 25. Courbes de traction-allongement dans les sens chaîne et trame pour les trois types de liage du tissu 3D interlock d'angle résiné.	33
Figure 26. Comparaison des ténacités spécifiques (gauche) et modules spécifiques (droite) des tissus non résinés et tissus résinés interlock d'angle pour les trois types de liage.	34
Figure 27. (gauche) Représentation géométrique en coupe des fils de trame - (milieu) Représentation de l'évolution des fils de chaîne - (droite) Numérotation des fils de trame de la structure élémentaire du tissu interlock A - Liage L 4-2-5 base diagonale 5-4 décochement de 3.	35
Figure 28. Vue en coupe des fils de chaîne issue de la représentation tomographique 3D de la structure interlock A - Liage L 4-2-5.	35
Figure 29. (gauche) représentation en coupe des fils de chaîne au sein d'un motif élémentaire du tissu - (droite) mesures des sections des fils de chaîne au sein de la structure tissée.	36
Figure 30. Représentation des évolutions de section des fils de chaîne de liage au sein du tissu interlock A - Liage L 4-2-5.	36
Figure 31. Classification des sections moyennes des fils de chaîne (gauche) au cœur de la structure (droite) et en périphérie de la structure.	36
Figure 32. Vue en coupe des fils de trame et évolution des fils de chaîne issue de la représentation tomographique 3D de la structure interlock A - Liage L 4-2-5.	37
Figure 33. Représentation en coupe des sections des fils de trame et de l'évolution des fils de chaîne au sein d'un motif élémentaire du tissu.	37
Figure 34. (gauche) superposition des 3 types d'évolution des fils de chaîne sur la vue en coupe des fils de trame - (droite) numérotation des sections des fils de trame d'un motif élémentaire de la structure tissée 3D interlock chaîne.	37
Figure 35. Superposition de l'évolution des fils de chaîne de liage (en couleur jaune et bleu) aboutissant soit au regroupement de fils de trame en section elliptique (gauche) -soit à la déformation de la section d'un fil de trame sous la forme d'un losange (droite).	38
Figure 36. Représentation des évolutions de forme de section des fils de trame au sein du tissu interlock A - Liage L 4-2-5.	38
Figure 37. (gauche) mesures des sections des fils de trame au sein d'un motif élémentaire du tissu - (droite) distinction des trois classes principales des formes de section des fils de trame.	38
Figure 38. Classification des sections moyennes des fils de trame (gauche) en contact dans la structure tissée avec les fils de chaîne de liage ou (milieu) en regroupement au sein de la structure tissée ou (droite) en périphérie de la structure tissée.	38
Figure 39. Résistance inter-laminaire en mode de rupture de type I et II des composites à base de tissus 2D empilés et de tissu 3D interlock chaîne [12].	44
Figure 40. Endommagement des fils dans la direction de l'épaisseur pendant la phase de délaminage de la structure tissée multi-couches [12].	45
Figure 41. Influence de la géométrie du renfort textile sur la contrainte en cisaillement inter-laminaire pour un mode de rupture de type II [22].	45
Figure 42. Influence de la vitesse d'impact sur les dimensions de surfaces endommagées des composites à base de laminés d'UD et de tissus 3D interlocks chaînes [11].	45
Figure 43. Influence du renfort textile et de la résine sur la contrainte en compression avant et après impact [22].	46
Figure 44. Comparaison des valeurs de contrainte en traction par rapport à l'allongement pour des composites à base de tissus 2D et 3D interlocks chaînes [12].	46
Figure 45. Comparaison des valeurs de résistance à la compression avant et après impact pour des composites à base de laminés d'UD et de tissus 3D interlocks chaînes [12].	47

Figure 46. (gauche) position des fils capteurs au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne - (milieu) fils de trame insérés dans le tissu 3D interlock chaîne (Interlock O - L 1-1-13) - (droite) échantillon résiné soumis à un test de flexion 3 points quasi-statique dans l'épaisseur.....	47
Figure 47. Représentation du comportement en flexion 3 points quasi-statique dans l'épaisseur du tissu 3D interlock chaîne carbone résiné par les mesures in-situ des deux positions des fils capteurs piezo-résistifs.....	48
Figure 48. (gauche) Représentation géométrique en coupe des fils de trame - (milieu) Représentation géométrique 3D (évolution des fils de chaîne) - (droite) tissu 3D interlock chaîne résiné de type A - liage L 3-2-9.....	49
Figure 49. Processus de déformation du tissu 3D interlock chaîne et observations en coupe des fils de trame de l'évolution des fils de chaîne des tissus 3D interlocks chaînes imprégnés.....	49
Figure 50. (gauche) disposition des colonnes de fils de trame en coupe - (droite) représentation des pas d'insertion des colonnes de fils de trame.....	49
Figure 51. Vues en coupe des fils de trame lors des différentes étapes de pliage des tissus 3D interlocks chaînes (gauche) inférieur à 90° - (milieu) supérieur à 90° - (droite) à 180°.....	50
Figure 52. Observations d'une partie de la section d'un fil de trame à l'échelle des filaments du fil de carbone à différentes phases de la déformation du tissu 3D interlock chaîne (gauche) pliage inférieur à 90° - (droite) pliage à 180°.....	50
Figure 53. (gauche) Représentation 3D de l'interlock O - Liage L 1-2-13 - (droite) vue en coupe des fils de chaîne de liage et leur disposition régulière sous forme de colonnes de fils de carbone pour le tissu 3D interlock chaîne.....	51
Figure 54. Vues en coupe des fils de chaîne des différentes étapes en pliage des tissus 3D interlocks chaînes (gauche) à 135° - (droite) à 180°.....	51
Figure 55. Représentation des lignes de contrainte maximale du tissu 3D interlock chaîne lors de l'étape de pliage.....	51
Figure 56. Procédé de mise en forme quasi-statique dans l'épaisseur d'un tissu 3D interlock chaîne (gauche) principe de fonctionnement - (droite) représentation du banc de test et son instrumentation associée.....	52
Figure 57. (gauche) représentation du poinçon hémisphérique - (milieu) tissu interlock 3D chaîne déformé - (droite) localisation des points de mesure sur les deux surfaces du tissu 3D interlock chaîne.....	53
Figure 58. Représentation dans la direction des fils de trame (gauche) et chaîne (droite) des valeurs des épaisseurs des trois architectures des tissus 3D interlocks chaînes déformés symétriquement et mesurées (milieu) aux sept points de la préforme.....	54
Figure 59. Mesure des valeurs d'avalement des tissus 3D interlocks chaînes dans les directions chaîne et trame.....	54
Figure 60. Disposition des 7 points de mesure situés sur chaque couche externe du tissu pour la mesure du glissement inter-couches.....	54
Figure 61. Représentations par zones de valeur identique de l'angle de cisaillement dans le plan des fils de chaîne et trame (gauche) pour le tissu interlock O - liage L 2-6-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort - (droite) pour le tissu interlock O - liage T 2-2-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort.....	55
Figure 62. (gauche) représentation du poinçon prismatique - (milieu) tissu 3D interlock chaîne déformé - (droite) localisation des points de mesure sur les deux surfaces du tissu 3D interlock chaîne.....	56
Figure 63. (gauche) représentation schématique globale de la fabrication d'un tissu - (droite) description précise des éléments de la machine à tisser en contact avec les fils de chaîne et trame lors de la formation du tissu.....	63
Figure 64. (gauche) Ouverture de la foule (shed) - (milieu) Insertion (pick in) du fil de trame - (droite) Tassement de la duite sur le point de façure par le peigne de la machine à tisser (reed beat up).....	64
Figure 65. (gauche) Positionnement d'un point de repère sur le tissu - (droite) positionnement d'un point de repère sur une lisse.....	64
Figure 66. Courbes des déplacements en X et en Y en fonction du temps du point de repère fixé (gauche) sur le tissu - (droite) sur la lisse.....	65
Figure 67. Mesure des sollicitations mécaniques par un capteur fil, situé proche des lamelles casse chaînes, avec un signal brut (rouge) et filtré (vert) lors du tissage sur machine à tisser industrielle.....	65
Figure 68. Mesure des sollicitations mécaniques par un capteur fil situé dans une lisse en mouvement dynamique verticale avec une fréquence d'acquisition de 1000 Hz.....	66
Figure 69. Repère orthonormé associé au fil et la loi de comportement isotrope transverse associée [18][19][20][21][22].....	66
Figure 70. Description des différentes étapes de simulation de la formation du tissu.....	67
Figure 71. (gauche) représentation du motif élémentaire du tissu d'armure toile - (droite) représentation des directions des plans de coupe du motif tissé réel et simulé.....	68
Figure 72. Comparaison des sections simulées (gauche) et réelles (droite) des fils de chaîne du tissu 2D d'armure toile pour les différents plans de coupe A-A, B-B et C-C.....	68
Figure 73. Comparaison des sections simulées (gauche) et réelles (droite) des fils de trame du tissu 2D d'armure toile pour les différents plans de coupe D-D, E-E et F-F.....	69
Figure 74. (gauche) représentation du motif élémentaire du tissu 2D d'armure croisé 2-2 - (droite) représentation des directions des plans de coupe du motif tissé réel et simulé.....	69
Figure 75. Comparaison des sections simulées (gauche) et réelles (droite) des fils de chaîne du tissu 2D d'armure croisé 2-2 pour les différents plans de coupe A-A, B-B et C-C.....	70
Figure 76. Comparaison des sections simulées (gauche) et réelles (droite) des fils de trame du tissu 2D d'armure croisé 2-2 pour les différents plans de coupe D-D, E-E et F-F.....	70
Figure 77. Comparaison du procédé de tissage 2D et du tissage 3D interlock chaîne [44].....	71
Figure 78. Sélection des différents types de fils de chaîne pour le tissage 3D interlock chaîne [44].....	71
Figure 79. Positionnement des fils de chaîne sur les cadres de la machine à tisser industrielle pour le tissage de tissus 3D interlocks chaînes.....	72
Figure 80. Principe d'ouverture de foule oblique (a) et de foule rectiligne (b) [3].....	72
Figure 81. Configurations du tassement du fil de trame par le peigne de la machine à tisser en foule fermée (a) ou en foule ouverte (b) [3].....	72
Figure 82. Positionnement des fils de chaîne de renfort et de liage sur des ensouples distinctes pour le tissage 3D interlock chaîne.....	73
Figure 83. Positionnement d'un "templet toute laize" (barre cylindrique) sur le tissu au niveau du point de façure.....	73
Figure 84. (gauche) représentation 3D par images tomographiques du tissu Interlock O - Liage T 1-4-4 avec fils de renforts (base armure toile) - (milieu) vue de dessus avec des fils de verre E de 900 Tex - (droite) vue de dessus avec des fils de verre E de 300 Tex.....	74
Figure 85. (gauche) représentation 3D par images tomographiques du tissu Interlock O - Liage T 2-4-4 avec fils de renforts (base armure croisé 2-2) - (milieu) vue de dessus avec des fils de verre E de 900 Tex - (droite) vue de dessus avec des fils de verre E de 300 Tex.....	74
Figure 86. (gauche) représentation 3D par images tomographiques du tissu Interlock A - Liage T 7-4-4 avec fils de renfort (base armure satin 8) - (milieu) vue de dessus avec des fils de verre E de 900 Tex - (droite) vue de dessus avec des fils de verre E de 300 Tex.....	74
Figure 87. (gauche) Cante des 24 ensouples de fils de chaîne - (milieu) Planche d'empoutage de positionnement dans l'épaisseur des fils de chaîne - (droite) Vue complète du cante d'ensouples et planche d'empoutage et mise en tension des fils de chaîne.....	75

Figure 88. (gauche) passage des fils de chaîne dans les lisses des cadres - (milieu) insertion automatique du fil de trame par lance rigide unilatérale dans la foule formée par les fils de chaîne du tissu 3D interlock chaîne - (droite) vue complète du système de sélection automatique des cadres et mise en tension des fils de chaîne.....	75
Figure 89. (gauche) Système de mise en tension individuelle des ensouples sur cantre - (milieu) système de sélection des cadres et d'insertion de fil de trame manuelle par navette - (droite) système de blocage des nappes de fils de chaîne.....	76
Figure 90. Observation des casses de fils de chaîne lors de la production des tissus interlocks en fils de verre E de titrage 300 Tex.....	78
Figure 91. Optimisation de la valeur de torsion du fil de para-aramide Kevlar-29 (3300 dTex).....	80
Figure 92. (gauche) Cantre des ensouples de fils de chaîne - (milieu) positionnement des fils de chaîne dans les planches d'empoutage - (droite) Ouverture de la foule sans fibrilles.....	80
Figure 93. Comparaison des valeurs moyennes des ténacités, modules et allongements des fils de para-aramides Kevlar-29 (3300 dTex) à chaque étape de la fabrication des tissus 3D interlocks chaînes.....	81
Figure 94. Propagation des ondes de déformation dans un fil soumis à un impact transversal [13].....	87
Figure 95. Configuration du fil chaque $40 \times 10 - 6s$ du fil élastique après un impact transversal de 180 m/s avec la propagation de l'onde longitudinale (flèche) et le déplacement des points matériels (espaces entre les tirés) [14].....	88
Figure 96. (gauche) description du dispositif de mesure dynamique d'un fil "Split Flying Bar" (SFB) - (droite) principe de fonctionnement du SFB.....	89
Figure 97. Évolution du système de mesure dynamique du fil SFB (gauche) version initiale - (droite) version finale.....	89
Figure 98. Observations par caméra rapide de la rupture dynamique du fil par SFB amélioré à 35 m/s.....	89
Figure 99. Réponses d'un tissu soumis à l'impact d'un projectile : (gauche) globale et (droite) locale [26][27].....	90
Figure 100. Représentation des différentes formes de projectile : (a) hémisphérique; (b) plate; (c) ogivale; (d) conique [26].....	91
Figure 101. Mode de fixation spécifique sur les deux côtés opposés dans la direction des fils de chaîne d'un tissu 3D interlock chaîne.....	92
Figure 102. Description du mécanisme d'endommagement d'un tissu à l'impact [45].....	93
Figure 103. (gauche) Description des phases du comportement d'un fil tiré d'un tissu lors des essais d'arrachement; (droite) Courbe force-déplacement d'un fil lors d'un test d'arrachement ("yarn pull-out") [61].....	93
Figure 104. Décomposition de l'énergie absorbée par les différents mécanismes du tissu à base de fils de verre E [82].....	94
Figure 105. Définition d'un modèle multi-échelle de tissu 3D interlock chaîne: (a) Observation des zones de déformation d'un tissu à l'impact [8] - (b) Vue globale du modèle de tissu 3D interlock chaîne multi-échelle - (c) Vue locale du modèle de tissu 3D interlock chaîne au point d'impact - (d) interface de connexion entre les modèles mésoscopique et macroscopique du tissu 3D interlock chaîne.....	95
Figure 106. Comparaison des temps de calcul des différents modèles de tissu (X% mésoscopique - Y% macroscopique): issus des simulations à l'impact aux vitesses initiales de : (a) 60 m/s - (b) 245 m/s.....	95
Figure 107. Repère orthonormé associé au fil et la loi de comportement isotrope transverse associée [92][93][94][95][96].....	96
Figure 108. Évolution de la vitesse en fonction de la variation du coefficient de Poisson $\nu_{12}$ dans le cas d'un impact : (gauche) sur un fil ondulé ; (droite) sur un tissu.....	97
Figure 109. Évolution de la vitesse en fonction de la variation du module d'Young transversal $E_{22}$ dans le cas d'un impact : (gauche) sur un fil ondulé ; (droite) sur un tissu.....	97
Figure 110. Évolution de la vitesse en fonction de la variation du module de cisaillement $G_{12}$ dans le cas d'un impact : (gauche) sur un fil ondulé ; (droite) sur un tissu.....	98
Figure 111. (gauche) Vue de dessus des dimensions du tissu 3D interlock chaîne soumis à l'impact d'une bille rigide - (milieu) Vue 3D de l'architecture tissée [104] du tissu interlock O - Liage T 1-5-5 à base de fils para-aramide Kevlar KM2 - (droite) Représentation des différentes évolutions au cours du temps de la vitesse résiduelle du projectile en fonction de la prise en compte des différents types de frottement.....	99
Figure 112. Représentation à $t = 10 \mu s$ de la déformation du tissu 3D interlock chaîne soumis à l'impact d'une bille d'acier à 900 m/s pour les deux paramétrages suivants: (gauche) prise en compte du frottement fils/fils et fils/projectile - (droite) aucun frottement fils/fils et fils/projectile.....	99
Figure 113. (gauche) Évolution de la vitesse résiduelle de la bille d'acier (diamètre 10 mm, masse 1,2 g) au cours du temps lors d'un impact sur les différentes géométries du tissu 3D interlock chaîne - (droite) Évolution de la déformée arrière des différentes géométries du tissu 3D interlock chaîne au cours du temps.....	100
Figure 114. Comparaison, à iso-masse surfacique, de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact de l'empilement de tissus non liés à base d'armure toile de para-aramide (930 dTex) et d'un tissu 3D interlock chaîne à base de fils para-aramide (1100 dTex) de type Interlock A -T liage 9-5-5 sur la base d'un sergé de 10 effet trame cordon à droite.....	101
Figure 115. (gauche) Représentation de la cible complète composé de 3 plis de tissus 3D interlock chaîne - (droite) Vue en coupe de la section des fils de trame des fils inox et para-aramide (1100 dTex) au sein d'un pli de tissu 3D interlock chaîne.....	101
Figure 116. Comparaison, à iso-masse surfacique, de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact du tissu 3D interlock chaîne à base de fils para-aramide (1100 dTex) de type Interlock A -T liage 9-5-5 sur la base d'un sergé de 10 effet trame cordon à droite avec des fils d'inox (0,3 et 0,9mm de diamètre) disposés en alternativement en surface du tissu avec les structures précédentes.....	102
Figure 117. Représentation du tissu Interlock O -L liage 1-1-11 avec fils de chaîne de surface: (gauche) vue en coupe de la section des fils de trame - (droite) vue 3D de la structure tissée.....	102
Figure 118. Schéma hypothétique d'absorption d'énergie à travers les couches pour un assemblage hybride d'un pli de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O -L liage 1-1-11 à base de fils de carbone 6k et de plusieurs plis de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O -L liage 1-1-11 à base de fils de para-aramide (930 dTex).....	103
Figure 119. Comparaison, à iso-masse surfacique, de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact de l'assemblage hybride d'un pli de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O -L liage 1-1-11 à base de fils de carbone 6k et de plusieurs plis de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O -L liage 1-1-11 à base de fils de para-aramide (930 dTex), des plis seuls de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O -L liage 1-1-11 à base de fils de para-aramide (930 dTex) et les structures précédentes.....	103
Figure 120. Comparaison, à iso-masse surfacique, de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact des différentes structures multi-couches tissées et tissus 3D interlock chaîne avec les valeurs des vitesses d'impact initiales de la bille rigide.....	104
Figure 121. Représentation du tissu Interlock O -L liage 1-2-7 à base de fils de para-aramide 1680 dTex: (gauche) vue en coupe de la section des fils de trame - (droite) vue 3D de la structure tissée.....	104
Figure 122. Représentation des vitesses résiduelles $V_s$ d'une bille rigide (diamètre 6 mm, masse 0,87 g) pour différentes vitesses initiales d'impact $V_e$ en sortie de chacune des 4 cibles composées de 3, 5, 7 et 9 plis de tissu Interlock O - L 1-2-7 à base de fils para-aramide 1680 dTex.....	105
Figure 123. Représentation des vitesses résiduelles $V_s$ d'une bille rigide (diamètre 6 mm, masse 0,87 g) pour différentes vitesses initiales d'impact $V_e$ en sortie de chacune des 4 cibles composées de 3 plis de tissu Interlock O - L 1-2-7 à base de fils para-aramide 1680 dTex avec différentes valeurs de densité en fils de chaîne et trame.....	105
Figure 124. Représentations des tissus Interlock O - Liage L 1-2 à 5 couches (gauche) et à 7 couches (droite).....	106

Figure 125. Variation de la vitesse de sortie du projectile par rapport à sa vitesse d'entrée vis-à-vis de la variation du nombre de couches internes.....	106
Figure 126. (gauche) Représentation des différentes transitions de phase de fil métallique à mémoire de forme de type Nickel-Titane[132] - (droite) Évolution du pouvoir amortissant des différentes phases de transition du matériau à l'état solide en fonction de la déformation [140].....	107
Figure 127. Description des différents composants de la cible à base de tissu para-aramide et Nitinol [133].....	107
Figure 128. Représentations 2D et 3D du tissu Interlock A - liage L 1-2-8 avec fils de chaîne de surface.....	109
Figure 129. Comparaison des 4 cibles selon : (gauche) la vitesse V50 en m/s d'un FSP de 20 mm - (droite) la déformée dynamique après impact (BFS) en mm.....	110
Figure 130. (gauche) plastrons avant et arrière découpés à plat avant assemblage - (milieu) rotation de la ligne de découpe pour chaque pli de tissu autour de la pointe avant de la poitrine - (droite) mise en forme 3D des plastrons avant et arrière du gilet pour un pli de tissu.....	110
Figure 131. (gauche) face avant du gilet pare-balles avec la localisation des 6 points d'impact - (milieu) visualisation des zones déformées en face arrière du gilet - (droite) empreintes des déformées dynamiques aux 6 points d'impact dans la plastiline Roma n°1.....	111
Figure 132. Décomposition des différents mécanismes d'absorption d'énergie par un impact à 158 m/s d'un projectile cylindrique (diamètre = 5 mm; hauteur = 2 mm; masse = 2,8 g) sur un laminé composite de tissus de verre E.....	119
Figure 133. Valeurs des diamètres fixes de projectile à $h$ , $13h$ et $23h$ de la forme conique initiale de la balle <b>7,62 × 51 mm AP WC</b> (typeAP8).....	122
Figure 134. Observations de la cible à 300 plis d'UD (pré-imprégné T700/résine époxy M10R) après impact à 924 m/s de 3 tirs de munition de type 7,62 × 51 mm AP WC (typeAP8) - (gauche) face avant - (droite) face arrière.....	123
Figure 135. Comportement à l'impact des 3 couches composites renforcées d'un tissu 3D interlock chaîne à base de fils polyéthylènes haut module [53].....	125
Figure 136. Cible céramique et composite à base de tissu 3D interlock chaîne (gauche) avant impact - (droite) après impact par une munition perforante de 12,7mm AP à 610 m/s selon la norme MIL-PRF-46103E type III [72].....	126
Figure 137. (gauche) Vue en coupe des 3 plis composites à base de tissu 3D interlock chaîne après impact - (droite) Vue en coupe de la structure de référence à base de films de polyéthylène haut module soumis au même type d'impact.....	126
Figure 138. Représentation schématisée d'une cible composée en face avant d'un blindage métallique et en face arrière d'un backing composite soumis à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 630 m/s selon la norme STANAG 4569 [76].....	126
Figure 139. (gauche) Cas de l'arrêt du projectile dans l'aluminium avec formation de bouchon en face arrière - (droite) Cas de la perforation de la plaque avec la formation d'un cratère « pétales de fleur » en face arrière [73].....	127
Figure 140. Représentations 2D et 3D des différents architectures de tissus 3D interlock chaîne : (gauche) Interlock O - liage L 1-2-13 avec fils de chaîne de surface - (milieu) Interlock O - Liage T 1-11-11 avec fils de chaîne de renfort - (droite) Interlock A - Liage T 11-6-6 base sergé imbriqué de 6 effet trame cordon à droite.....	127
Figure 141. Évolution de la masse surfacique des plaques composites en fonction de l'épaisseur.....	128
Figure 142. Représentation de la forme d'endommagement bi-directionnelle en face arrière du tissu Interlock A - Liage T 11-6-6 base sergé imbriqué de 6 effet trame cordon à droite (fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex)) avec 40 fils de chaîne/cm et 40 fils de trame/cm impacté par un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse initiale de 640 m/s.....	129
Figure 143. Représentation de la forme d'endommagement localisée en face arrière du tissu Interlock O - liage L 1-2-13 (fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex)) avec fils de chaîne de surface à 40 fils de chaîne/cm et 52 fils de trame/cm impacté par un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse initiale de 620 m/s.....	129
Figure 144. Représentation de la forme d'endommagement uni-directionnelle en face arrière du tissu (gauche) Interlock O - liage L 1-2-13 (fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex)) avec fils de chaîne de surface à 20 fils de chaîne/cm et 130 fils de trame/cm impacté par un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse initiale de 700 m/s - (droite) Interlock O - liage L 1-2-13 (fils polyester aromatique Vectran (2×1650 dTex)) avec fils de chaîne de surface à 20 fils de chaîne/cm et 130 fils de trame/cm.....	129
Figure 145. Comparaison des solutions de protection (face avant matériau métallique et face arrière matériau composite) en fonction de la vitesse limite de protection (VLP) et un critère énergétique <i>VLP2masse surfacique</i> .....	130
Figure 146. (gauche) Représentation schématisée d'une cible composée en face avant d'un sur blindage et blindage métallique et en face arrière d'un backing composite soumis à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 1600 m/s selon la norme STANAG 4569 [76] - (droite) Observation des plaques de sur-blindage et blindage métallique perforées et du backing composite non perforé.....	131
Figure 147. Représentation du tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 (gauche) en vue 3D - (droite) vue en coupe des fils de trame avec la formule de tramage (3 fils comelés para-aramide Twaron (3360 dTex)/ polyéthylène basse densité (1850 dTex) - 1 fil para-aramide Twaron (3360 dTex)).....	132
Figure 148. Représentation du tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 à base de fils para-aramide Twaron (3360 dTex) (gauche) en vue 3D - (droite) vue en coupe des fils de trame.....	132
Figure 149. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (bas) du backing composite type Tissu 2D prepreg 10 mm après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) pour une vitesse d'impact de : (gauche) 1610 m/s - masse surfacique = 153 kg/m <sup>2</sup> - non perforation, (milieu) 1740 m/s - masse surfacique = 151,6 kg/m <sup>2</sup> - perforation, (droite) 1808 m/s - masse surfacique = 153,5 kg/m <sup>2</sup> - perforation.....	133
Figure 150. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (bas) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 13 mm après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) pour une vitesse d'impact de : (gauche) 1621 m/s - masse surfacique = 155,8 kg/m <sup>2</sup> - non perforation, (milieu) 1661 m/s - masse surfacique = 154,1 kg/m <sup>2</sup> - perforation, (droite) 1607 m/s - masse surfacique = 156,9 kg/m <sup>2</sup> - non perforation.....	133
Figure 151. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (bas) du backing composite type Tissu 3D ThDurcis sable 20 mm après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) pour une vitesse d'impact de : (gauche) 1666 m/s - masse surfacique = 166 kg/m <sup>2</sup> - perforation, (milieu) 1570 m/s - masse surfacique = 166 kg/m <sup>2</sup> - non perforation, (droite) 1532 m/s - masse surfacique = 163,9 kg/m <sup>2</sup> - non perforation.....	133
Figure 152. Représentation schématisée des deux types de backing composite : (gauche) Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 2D prepreg 5 mm - (droite) Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 3D ThPlastique 5 mm, soumis à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 1600 m/s selon la norme STANAG 4569 [76].....	134
Figure 153. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (milieu) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 8 mm (gauche) et du backing composite de type Tissu 2D prepreg 5 mm (droite) après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse d'impact de 1700 m/s - masse surfacique = 155,2 kg/m <sup>2</sup> aboutissant à une perforation - (bas) vue en coupe du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 2D prepreg 5 mm après impact.....	135
Figure 154. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (milieu) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 8 mm (gauche) et du backing composite de type Tissu 2D prepreg 5 mm (droite) après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse	

54 g) à une vitesse d'impact de 1666 m/s - masse surfacique = 155,2 kg/m <sup>2</sup> aboutissant à une non perforation - (bas) vue en coupe du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 2D prepreg 5 mm après impact. ....	135
Figure 155. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (milieu) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 8 mm (gauche) et du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 5 mm (droite) après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse d'impact de 1682 m/s - masse surfacique = 154,5 kg/m <sup>2</sup> aboutissant à une non perforation - (bas) vue en coupe du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 3D ThPlastique 5 mm après impact. ....	136
Figure 156. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (milieu) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 8 mm (gauche) et du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 5 mm (droite) après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse d'impact de 1742 m/s - masse surfacique = 155,7 kg/m <sup>2</sup> aboutissant à une non perforation - (bas) vue en coupe du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 3D ThPlastique 5 mm après impact. ....	136
Figure 157. Description synthétique des différentes étapes du logiciel TEXTILE ANALYSIS [28]. ....	148

# Liste des tableaux

Tableau 1. Description des différentes classes de tissus 3D interlocks chaines en fonction des valeurs de pas $x$ , de profondeur de liaison des fils de chaîne $y$ et du nombre de couches de fils de trame $n_{wft}$ .....	19
Tableau 2. Tissu 3D interlock chaîne à consommation non constante en longueur des fils de chaîne [(dont 8 fils de chaîne de liage + 6 fils de chaîne de renfort) / 4 couches de fils de trame].....	21
Tableau 3. Différentes architectures de tissu 3D interlock chaîne en liage couche à couche.....	23
Tableau 4. Description du regroupement et ordre des fils de chaîne dans chaque dent de peigne pour les 3 tissus 3D interlocks chaines.....	23
Tableau 5. Paramètres des tissus interlock A à base de fils de carbone 6k IM7 - 223 Tex .....	30
Tableau 6. Caractéristiques mesurées et calculées des différentes architectures des tissus 3D interlocks chaines [45].....	31
Tableau 7. Caractéristiques mécaniques en traction quasi-statique des tissus 3D interlocks carbonés d'angle pour les trois types de liage.....	31
Tableau 8. Images tomographiques en coupe des sections des fils de trame montrant l'évolution des fils de chaîne (colonne de gauche) et en coupe des sections des fils de chaîne montrant l'évolution des fils de trame (colonne de droite) des tissus résinés Interlock A-liage T 5-5-5, liage L 3-3-5 et liage L 2-2-5.....	32
Tableau 9. Caractéristiques mesurées et calculées des différentes architectures des tissus interlocks résinés.....	32
Tableau 10. Caractéristiques mécaniques en traction quasi-statique des tissus interlocks carbonés d'angle résinés pour les trois types de liage.....	33
Tableau 11. Ténacités et modules spécifiques des tissus et tissus résinés 3D interlock d'angle pour les trois types de liage.....	34
Tableau 12. Représentations en coupe et vues 3D des architectures des trois tissus 3D interlocks chaines .....	53
Tableau 13. Récapitulatif des mesures effectuées sur les trois architectures des tissus 3D interlocks chaines déformés de façon symétrique.....	55
Tableau 14. Représentations en coupe et vues 3D des architectures des deux tissus 3D interlocks chaines.....	57
Tableau 15. Récapitulatif des mesures effectuées sur les deux architectures des tissus 3D interlocks chaines déformés de façon asymétrique.....	57
Tableau 16. Valeurs des modules de Young (GPa), de cisaillement (GPa) et coefficients de Poisson pour le fil de verre E.....	66
Tableau 17. Masse surfacique et épaisseur des tissus 3D interlocks chaines.....	73
Tableau 18. Caractéristiques physiques des trois architectures tissées 3D interlocks chaines .....	79
Tableau 19. Tests de tractions à différentes vitesses sur fil polyéthylène haut module Dyneema SK75, 1760 dTex sans torsion.....	88
Tableau 20. Comparaison des mesures statiques et dynamiques sur fil Kevlar 129 - 3300 dTex.....	89
Tableau 21. Valeurs des modules de Young (GPa), de cisaillement (GPa) et coefficient de Poisson pour le fil de para-aramide Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31gcm^3$ ) [83] [98] [99].....	96
Tableau 22. Variation des valeurs du coefficient de Poisson $\nu_{12}$ pour le fil de para-aramide Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31gcm^3$ ) [83] [98] [99].....	96
Tableau 23. Variation des valeurs du module d'Young transversal $E_{22}$ pour le fil de para-aramide Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31gcm^3$ ) [83] [98] [99].....	97
Tableau 24. Variation des valeurs du module de cisaillement $G_{12}$ pour le fil de para-aramide Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31gcm^3$ ) [83] [98] [99].....	98
Tableau 25. Caractéristiques géométriques des deux tissus 3D interlock chaines.....	100
Tableau 26. Observation des cibles à base de tissu para-aramide/ Nitinol après impact balistique de niveau III et niveau IV de la norme NIJ 0101-06 [31].....	108
Tableau 27. Composition des différentes cibles à base de matériaux textiles assemblés par couche.....	109
Tableau 28. Résultats des essais de tirs de balles de 9 mm FMJ RN à 350 m/s du niveau II de la norme NIJ 0101.06 [31] et mesures des déformées dynamiques dans la plastiline Roma n°1.....	111
Tableau 29. Nombre de couches théoriques de plis d'UD (pré-imprégné T700/résine époxy M10R) nécessaires pour stopper le projectile 7,62 x 51 mm AP WC (type AP8) en fonction des paramètres de durée d'impact et de diamètre équivalent de projectile.....	123
Tableau 30. Résultats des tirs sur l'observation de l'effet de masse .....	123
Tableau 31. Différentes valeurs de durée d'impact et de diamètre équivalent du projectile pour une solution à 300 plis d'UD (pré-imprégné T700/résine époxy M10R) .....	124
Tableau 32. Caractéristiques dimensionnelles des différentes combinaisons de plaques composites situées en face arrière de la cible finale.....	128
Tableau 33. Détermination des performances balistiques de la solution de protection (face avant matériau métallique et face arrière backing composite) à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) et observation des principales formes d'endommagement.....	129
Tableau 34. Caractéristiques du backing composite (Tissu 2D prepreg 10 mm) à base de 27 plis de tissus 2D para-aramide pré-imprégnés.....	131
Tableau 35. Caractéristiques du backing composite (Tissu 3D ThPlastique 13 mm) à base de 3 plis de tissus 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3.....	131
Tableau 36. Caractéristiques du backing composite (Tissu 3D ThDurcissable 20 mm) à base de 27 plis de tissus 2D para-aramide pré-imprégnés.....	132
Tableau 37. Bilan de la valorisation scientifique sur l'ensemble de la carrière universitaire .....	151



# Introduction Générale

Les résultats et analyses, présentés dans les 5 principaux thèmes de ce rapport, s'articulent tous autour d'un même dénominateur commun que sont : les tissus 3D interlocks chaines. En effet, les différents travaux de recherche, effectués sur la période 2006 - 2014, ont débuté par l'identification d'une solution de protection dure à l'impact de munition perforante, composée d'une partie en céramique et d'une autre partie en composite textile. Le renfort fibreux utilisé pour cette application a été fabriqué, pour la première fois, sur une machine à tisser de prototypage, à insertion manuelle des fils de trame et ne possédant qu'une seule ensouple de fils de chaîne. Sans aucune connaissance au préalable, ni aucune maîtrise du procédé de tissage, nous avons produit la quantité nécessaire et suffisante pour réaliser 3 cibles, composées chacune de 3 plis de tissu 3D interlock chaîne. Les essais balistiques effectués sur ces 3 cibles se sont révélés concluants en termes de protection et très prometteurs en termes de potentiel d'utilisation et de champ exploratoire de recherche. Fort de ce premier résultat, nous avons poursuivi différents travaux de recherche sur les structures 3D interlocks chaines, à la fois sur les paramètres de produit que de procédé de fabrication. Les résultats issus en partie des travaux de recherche de 14 thèses de doctorat (9 soutenues et 2 en cours en co-encadrement et 3 thèses de doctorat soutenues en collaboration directe), de 49 projets de fin d'études (ingénieur et masters), se répartissent donc en 5 thèmes principaux dont l'objectif final consiste à mieux comprendre les tissus 3D interlocks chaines, à la fois en tant que matériau à propriétés physiques et mécaniques spécifiques mais aussi en tant que procédé de fabrication adapté à la réalisation des structures tissées 3D interlocks chaines.

Le premier thème se focalise sur l'observation et la paramétrisation des tissus 3D interlocks chaines afin de définir le plus précisément les structures tissées réelles observées. Une définition des tissus 3D interlocks chaines ainsi qu'une classification des différents types d'architectures sont exposées. Différentes observations par le biais de vues en coupe des fils de chaîne et trame permettent de révéler la complexité de représentation des géométries des tissus 3D interlocks chaines ainsi que l'influence des paramètres du procédé de tissage sur les modifications de positionnement des fils dans la structure tissée multi-couches. Une classification des principales formes de section des fils de chaîne et trame d'un tissu 3D interlock chaîne est présentée afin d'optimiser la représentation globale de la structure tissée multi-couches. Enfin, l'influence du type de liage du tissu 3D interlock chaîne sur les propriétés mécaniques en mode de sollicitation quasi-statique est révélée à la fois sur des renforts résinés et non résinés.

Le deuxième thème tend à révéler les propriétés résiduelles des tissus 3D interlocks chaines en tant que renfort fibreux multidirectionnel pour des structures composites complexes. Par le biais d'une étude bibliographique complétée de nos résultats de recherche, nous avons mis en évidence les avantages et inconvénients du procédé de fabrication, de l'architecture tissée et des propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines. La résistance au délaminage ainsi que la résistance à l'impact semblent être les deux caractéristiques mécaniques principales des tissus 3D interlocks chaines. Sur la base de ces propriétés, nous avons montré la capacité de déformation, par procédé de pliage et de mise en forme dans la direction de l'épaisseur, à vitesse quasi-statique, des tissus 3D interlocks chaines.

Le troisième thème analyse le procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines, permettant d'en révéler son caractère complexe et nécessitant quelques adaptations. L'observation visuelle par images issues de vidéo rapides de la cinématique du procédé de tissage et la mesure des contraintes appliquées sur la matière par l'utilisation de fils capteurs innovants aboutissent à une meilleure compréhension de la fabrication des tissus. La cinématique du procédé de tissage a été reproduite par simulation, permettant d'analyser les différents mouvements dynamiques des éléments de la machine à tisser qui influent sur la géométrie finale de l'architecture tissée. L'observation des sections transverses des fils de chaîne et trame, ainsi que leur positionnement dans le tissu, montrent une bonne corrélation entre les simulations et les tissus produits. L'optimisation du procédé de fabrication a permis de minimiser la dégradation des fils au cours du tissage. La conception de machines à tisser de prototypage adaptées aux tissus 3D interlocks chaines pour l'ensemble des types de fils (carbonés et autres natures) repose sur cette expérience et compréhension du procédé de fabrication et a permis de l'optimiser aux structures tissées multi-couches.

Le quatrième thème identifie des solutions de protection souple à l'impact, notamment en définissant les modes de déformation dynamique des structures textiles. Un modèle numérique multi-échelles, macroscopique et mésoscopique, de tissu 2D a permis de simuler l'influence de différents paramètres de fils sur la performance balistique des structures tissées. Différents travaux de recherche expérimentaux d'impacts sur des tissus 3D interlock chaîne ont permis de révéler l'influence sur la performance balistique de certains paramètres du tissu; notamment l'homogénéité des valeurs de densité des fils de chaîne et trame, le nombre de couches du tissu 3D interlock chaîne et les tirages de fils de chaîne et trame. Sur la base de cette compréhension du modèle de comportement à l'impact des structures textiles souples, trois solutions différentes ont été proposées pour répondre aux besoins de protection des gilets pare-balles sous différentes vitesses et munitions.

Enfin, le cinquième thème identifie des solutions de protection dure à l'impact, intégrant notamment des matériaux composites seuls ou couplés à d'autres matériaux de type métallique ou céramique. Par le biais d'une analyse bibliographique complétée de nos observations de recherche, nous avons mis en évidence les paramètres endogènes des tissus 3D interlocks chaines pouvant influencer sur le mode de comportement à l'impact. Sur la base de ces caractéristiques, nous avons identifié différentes solutions de protection dure, intégrant des matériaux composites, de renforts fibreux de type tissu 3D interlock chaîne de différentes architecture et composés de différents fils et résines, pour répondre aux impacts de diverses munitions à différentes vitesses.

Une conclusion générale nous permet de recenser les principaux résultats qui définissent les tissus 3D interlocks chaines en tant que matériau utilisé seul ou en tant que renfort fibreux de matériaux composites pour diverses applications, tout en soulignant les principales optimisations du procédé de fabrication permettant d'aboutir à l'ensemble de ces innovations. Les perspectives de recherche sont également présentées pour l'ensemble de ces thèmes.

Les travaux de recherche, non présentés dans ce cadre relatif aux tissus 3D interlocks chaines et qui se sont déroulés majoritairement pendant la période 1995-2005, sont exposés à la suite de la conclusion générale et perspectives, dans une partie relatant le déroulé de ma carrière universitaire et professionnelle.

# Thème 1. Classification et paramétrage des tissus 3D interlocks chaines

Le premier thème se focalise sur l'observation et le paramétrage des tissus 3D interlocks chaines afin de définir le plus précisément les structures tissées réelles observées. Une définition des tissus 3D interlocks chaines ainsi qu'une classification des différents types d'architectures sont exposées. Différentes observations par le biais de vues en coupe des fils de chaîne et trame permettent de révéler la complexité de représentation des géométries des tissus 3D interlocks chaines ainsi que l'influence des paramètres du procédé de tissage sur les modifications de positionnement des fils dans la structure tissée multi-couches. Une classification des principales formes de section des fils de chaîne et trame d'un tissu 3D interlock chaîne est présentée afin d'optimiser la représentation globale de la structure tissée multi-couches. Enfin, l'influence du type de liage du tissu 3D interlock chaîne sur les propriétés mécaniques en mode de sollicitation quasi-statique est révélée à la fois sur des renforts résinés et non résinés.

## Sommaire

I.	Introduction .....	15
II.	Définition d'un tissu 3D interlock chaîne .....	15
	A. Représentation générale des tissus 2D .....	15
	B. Représentation générale des tissus 3D interlock chaîne .....	16
III.	Classification des tissus 3D interlocks chaines .....	17
	A. Classification actuelle des tissus 3D interlocks chaines .....	17
	B. Amélioration de la classification actuelle des tissus 3D interlocks chaines .....	20
	C. Conclusion sur la classification des tissus 3D interlocks chaines.....	22
IV.	Paramétrage des tissus 3D interlocks chaines .....	22
	A. Influence des paramètres de procédé de fabrication.....	22
	1. Positionnement des fils de chaîne dans le peigne de la machine à tisser des tissus 3D interlocks chaines .....	22
	2. Ordre de sélection des fils de chaîne et trame des tissus 3D interlocks chaines.....	24
	B. Influence des paramètres de produit.....	26
	1. Densité des fils de chaîne des tissus 3D interlocks chaines .....	26
	2. Architecture des tissus 3D interlocks chaines.....	27
	3. Pas et profondeur de liage de l'architecture des tissus 3D interlocks chaines .....	30
	C. Influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication.....	34
	1. Observation de la section géométrique des fils de chaîne au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne.....	35
	2. Observation de la section géométrique des fils de trame au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne.....	36
	D. Conclusion sur l'influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines ..	39
V.	Synthèse .....	39
VI.	Bibliographie .....	39

## I. Introduction

L'objectif général de ce thème consiste à mieux comprendre la complexité de la géométrie d'une structure tissée 3D interlock chaîne par la définition précise de cette architecture tissée multi-couches et par la compréhension de l'influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication sur la géométrie finale conduisant à des caractéristiques mécaniques différentes. Sur la base de cette définition, nous pouvons ensuite les distinguer en différentes classes selon des paramètres de produit du tissu 3D interlock chaîne, que nous proposons d'enrichir par la prise en compte de paramètres de procédé de fabrication. Nous pouvons également mesurer l'influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication sur la modification de géométrie des tissus 3D interlocks chaînes. Puis, observer les trajectoires et les sections des fils de chaîne et trame au sein de la structure tissée multicouches par le biais d'images tomographiques. Enfin, nous pouvons identifier les paramètres de produit et de procédé de fabrication qui influencent et modifient les caractéristiques mécaniques finales des tissus 3D interlocks chaînes résinés et non résinés.

Sur la base de notre comparaison des méthodes de représentations géométriques des structures textiles [1], et aussi au cours des travaux de recherche de Nauman [2], nous avons pu constater le manque de précision actuelle sur les outils de représentation de la géométrie des tissus 3D interlocks chaînes et de leurs paramètres associés. En effet, les outils actuels de représentation géométrique d'une architecture tissée, tels que : Texgen développé par Sherburn [3] ou WiseTex développé par Lomov [4], n'intègre pas l'ensemble des paramètres de procédé de fabrication nécessaires à la reproduction exacte des positionnements et des déformations des fils de chaîne et trame d'une architecture tissée 3D interlock chaîne. A l'inverse les outils de conception des tissus multicouches, tels que : Pointcarré [5] et son option (non commercialisé) de tissu 3D, ou DesignScope [6] et son outil cross section, permettent d'intégrer directement le mode de représentation 3D des tissus à partir des paramètres du procédé de fabrication et également des paramètres de produit tels que les armures des tissus disposés par couche dans l'épaisseur de la structure tissée 3D interlock chaîne. Cependant, ces outils de conception actuels nécessitent des compétences dans le domaine du tissage, notamment pour sélectionner et positionner les armures de liage compatibles entre les couches, conduisant à des architectures tissées réalisables sur machine à tisser et intégrant les différences de consommation et de tension des fils de chaîne lors de l'étape de fabrication. De plus, la définition précise des tissus 3D interlocks chaînes nécessite une connaissance initiale des armures de liage des tissus 2D permettant de représenter le positionnement des points d'entrecroisements des fils de chaîne de liage avec les fils de la trame de la 1<sup>ère</sup> couche supérieure de l'architecture tissée 3D.

## II. Définition d'un tissu 3D interlock chaîne

De façon générale, le tissage crée des surfaces, qui sont obtenues par l'entrecroisement de fils parallèles disposés dans le sens de la longueur (la chaîne - axe X) et de fils perpendiculaires disposés dans le sens de la largeur (la trame - axe Y) (Figure 1) [7][8]. La définition de la norme AFNOR NF G 00-001 indique qu'un tissu est une étoffe formée par l'entrecroisement généralement perpendiculaire de deux ensembles de fils : cet entrecroisement est réalisé au cours du tissage sur une machine à tisser [9][10][11].

### A. Représentation générale des tissus 2D

Ainsi, trois directions peuvent être utilisées pour représenter le liage obtenu par un tissu (Figure 1) :

- la première direction X permet de représenter l'évolution d'un fil de trame par une vue en coupe des fils de chaîne,
- la deuxième direction Y permet de représenter l'évolution d'un fil de chaîne par une vue en coupe des fils de trame,
- la troisième direction Z, suivant la normale au tissu, permet de représenter l'ensemble des entrecroisements des fils de chaîne et trame caractérisant ainsi l'armure.

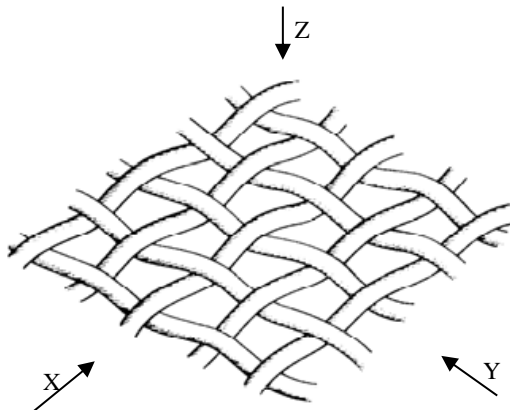


Figure 1. Mode d'observation d'un tissu dans un repère (X, Y, Z).

Le mode de liage des fils de chaîne et trame peut être représenté de façon géométrique par le biais d'une mise en carte [12] (Figure 2), dont chaque rangée verticale représente un fil de chaîne  $C_i$  et chaque rangée horizontale un fil de trame  $T_j$ . Chaque

case  $I_{i,j}$  représente l'intersection d'un fil de chaîne  $C_i$  et d'un fil de trame  $T_j$ . Deux évolutions du fil de chaîne sont possibles et désignées par les deux états suivants [13] :

- pris; sélection du fil de chaîne  $C_i$  en position haute par rapport au fil de trame  $T_j$ , la case  $I_{i,j}$ , de la mise en carte est; géométriquement remplie, numériquement égale à 1.
- laissé; sélection du fil de chaîne  $C_i$  en position basse par rapport au fil de trame  $T_j$ , la case  $I_{i,j}$ , de la mise en carte est; géométriquement vide, numériquement égale à 0.

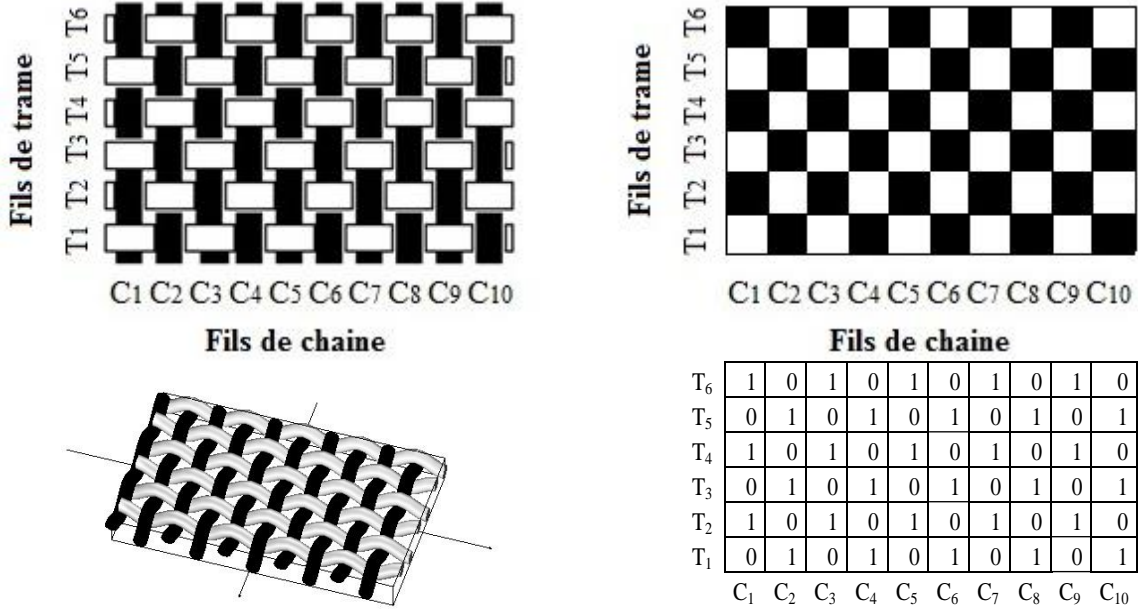


Figure 2. (haut-gauche) Observation selon une direction normale au plan du tissu - représentations géométriques 2D (haut-droite) et 3D (bas-gauche)- représentation du codage numérique équivalent (bas-droite).

L'armure d'un tissu caractérise donc le motif élémentaire géométrique  $M_{i,j}$  pouvant se répéter  $X$  fois dans le sens chaîne et  $Y$  fois dans le sens trame. La théorie des armures regroupe l'ensemble des motifs géométriques élémentaires  $M_{i,j}$  construit selon différentes règles de répartition des points de liage entre les fils de chaîne et trame afin d'obtenir des constructions géométriques régulières ou irrégulières [14].

Cette représentation géométrique des tissus s'applique aussi bien pour des tissus dit 2D; appellation 2D qui considère une seule couche  $X$  ( $X = 1$ ) de fils de chaîne et une seule couche ( $Y = 1$ ) de fils de trame, que pour des tissus dit 3D; appellation 3D qui englobe les tissus avec  $X$  ( $X \in [2, n]$ ) couches de fils de chaîne et  $Y$  ( $Y \in [2, p]$ ) couches de fils de trame.

Ainsi, chaque couche d'un tissu composé de plusieurs couches de tissus liés dans l'épaisseur par les fils de chaîne, dit tissu 3D interlock chaîne, peut être définie par la représentation géométrique d'un tissu 2D (Figure 3).

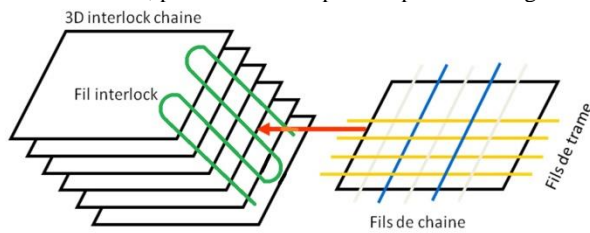


Figure 3. Représentation géométrique d'un tissu multi-couches lié dans l'épaisseur par les fils de chaîne.

## B. Représentation générale des tissus 3D interlock chaîne

La structure tissée 3D interlock chaîne consiste en l'assemblage de fils chaîne et trame dans une direction plan mais aussi dans l'épaisseur de la structure. Plusieurs arrangements de fils peuvent être réalisés et permettent d'obtenir une grande quantité de structure 3D [15]. Un tissu 3D interlock chaîne, ou tissu 3D est un renfort tissé qui, comme les tissus 2D, présente des fibres entrelacées non seulement dans les deux directions du plan (chaîne et trame), mais aussi un troisième type de fil évoluant dans l'épaisseur, apportant une cohésion à l'ensemble du renfort.

Là où les tissus 2D ne peuvent que faire varier leur motif d'entrelacement dans le plan, les tissus 3D interlocks chaînes présentent une modularité permettant un grand nombre de renforts. On peut observer que le tissu 3D interlock chaîne est renforcé dans les 3 directions, chaque groupe de fils assurant une fonction bien précise au sein de la structure [16]. La représentation schématique d'une structure tissée 3D interlock chaîne (Figure 4) illustre le rôle de chaque fil intervenant dans sa fabrication [17].

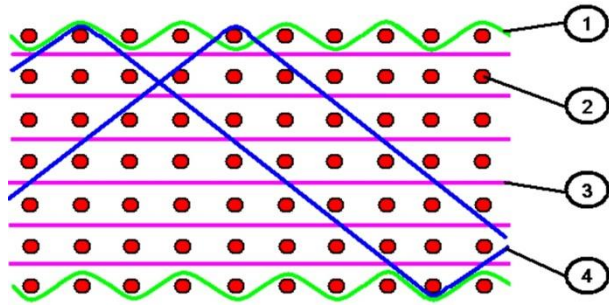


Figure 4. Représentation schématique par une vue en coupe des fils de trame d'une structure tissée 3D interlock chaîne.

1. Les fils de chaîne de surface (surface weaver) sont intégrés dans la structure tissée lorsque celle-ci requiert un état de surface de chaque face du tissu avec une rugosité plus ou moins précise. Ces fils n'ont pas de grande influence sur les propriétés mécaniques du tissu, ils ont plutôt un rôle « esthétique »
2. Les fils de trame (fill yarns) sont perpendiculaires aux fils de chaîne et insérés à chaque formation de foule sur machine à tisser. Ces fils déterminent le nombre de couches de la structure tissée 3D interlock chaîne et contribuent essentiellement aux propriétés mécaniques transversales du tissu multi-couches.
3. Les fils de chaîne de liage (Weavers or web yarns) sont directement positionnés sur la machine à tisser et permettent de lier dans l'épaisseur les différentes couches du tissu. Ces fils contribuent essentiellement à maintenir la cohésion de l'ensemble de la structure tissée en fonction de leur densité dans la structure multi-couches et apportent donc de la résistance inter-laminaire.
4. Les fils de chaîne de renfort (Stuffer yarns or longitudinal yarns) sont également des fils de chaîne positionnés sur la machine à tisser et contribuent aux propriétés mécaniques longitudinales du tissu multi-couches.

Sur la base de cette représentation générale des tissus 3D interlocks chaînes, nous pouvons les distinguer par classes selon leurs paramètres produits.

### III. Classification des tissus 3D interlocks chaînes

Différents types de classification des tissus 3D interlocks chaînes ont été proposées. Il est important de pouvoir les classer afin de les comparer selon des paramètres produits identiques [18].

#### A. Classification actuelle des tissus 3D interlocks chaînes

Deux types d'approches peuvent être utilisés pour classer les tissus 3D interlocks chaînes [19][2]. La première est fondée sur les différentes adaptations du procédé de fabrication par tissage [20]. La seconde repose sur le type de structures 3D; plus précisément les structures 3D solides pleines ou les structures 3D d'enveloppes [21].

De façon à définir les tissus 3D interlocks chaînes, différentes méthodes de classification ont été abordées dans la littérature [22].

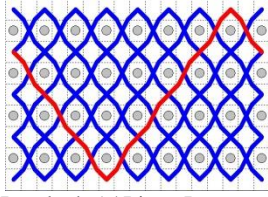
La classification de Bogdanovitch et al. [23] permet de différencier les formes des structures. Les structures 3D sont classées soit par formes tubulaires soit sous forme de tissus. Il définit d'abord l'aspect 3D de ces renforts, acquis lors du tissage où un type de fil traverse plusieurs couches dans l'épaisseur. C'est une notion qu'il ne faut pas confondre avec la mise en forme du renfort qui peut aussi être 3D (tubes, jonctions ou panneaux de forme complexe par exemple).

La classification de Hu [24], reprise par Ansar et al. [25], regroupe les tissus 3D interlocks chaînes en 4 classes, chacune de ces classes étant représentée sans fils de chaîne de renfort en Figure 5. Comme le résume Ha-Minh [26], deux paramètres géométriques sont utilisés pour distinguer les tissus 3D interlocks chaînes, le premier paramètre est relatif à l'angle d'ondulation des fils de chaîne de liaison dans l'épaisseur, et le second paramètre correspond à la profondeur à laquelle les fils de chaîne pénètrent dans l'épaisseur. En combinant ces deux paramètres, on obtient quatre classes de tissu 3D interlock chaîne.

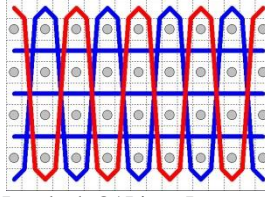
Cette distinction se rapproche de la nomination des structures interlocks dits par couplage orthogonal ou couplage d'angle défini par Sheng et al. [27] et Gu et al. [28], puis représentée par Nauman [29].

- « angle interlock/through thickness bonding » (A/T) - interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur. Dans cette configuration, les fils de chaîne lient toute l'épaisseur de la structure dans une direction diagonale.
- « angle interlock/layer to layer bonding » (A/L) - interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne couche à couche. Dans cette structure, les fils de chaîne lient les couches entre elles dans une direction diagonale et non plus à travers l'épaisseur de la structure.
- « orthogonal interlock/through thickness bonding » (O/T) - interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur. Les fils de chaîne vont lier les couches entre elles dans l'épaisseur de la structure avec un angle d'inclinaison orthogonal.
- « orthogonal interlock/layer to layer bonding » (O/L) - interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne couche à couche. Les fils de chaîne lient ici au moins deux couches entre elles entre deux colonnes de fils de trame.

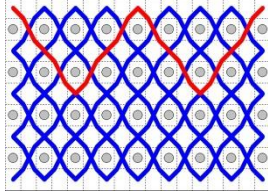
Interlock A/ Liage T



Interlock O/ Liage T



Interlock A/ Liage L



Interlock O/ Liage L

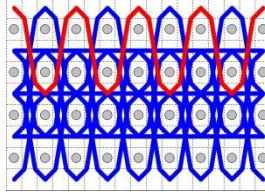


Figure 5. Les 4 classes de tissus 3D interlocks chaines selon la classification de Hu [24].

Cette approche de classification [30][31] permet une description générique de tous les types de liage; ce qui permet d'aboutir à une définition générale de toutes les structures interlocks.

Aussi, sur la base de ces différentes approches de classification, nous avons pu fournir une définition plus globale des tissus 3D interlocks chaines par le biais des travaux de recherche de Cristian [32] en introduisant les paramètres suivants :

- Le nombre de couches  $n_{wft}$  ou  $N_c$  d'un tissu interlock est représenté par le nombre de nappes de fils de trame superposées.
- Le pas de liaison des couches  $x$  ou  $P$  représente le nombre de fils de trame compris entre deux points de liaison des fils de chaîne de liage avec les trames d'une même couche. Le pas de liaison est l'équivalent du rapport d'armure de base du tissu 2D ramené au niveau de chaque couche.
- La profondeur de liaison des couches  $y$  ou  $P_L$  représente le nombre de couches de fils de trame  $n_{wft}$  lié par les fils de chaîne de liage. La profondeur de liaison des différents fils de chaîne peut être une donnée constante ou variable, dont la valeur  $y \in [2, \dots, n_{wft}]$ .

La représentation des différents types de liage de la Figure 6 permet d'illustrer les paramètres endogènes d'un tissu 3D interlock chaîne.

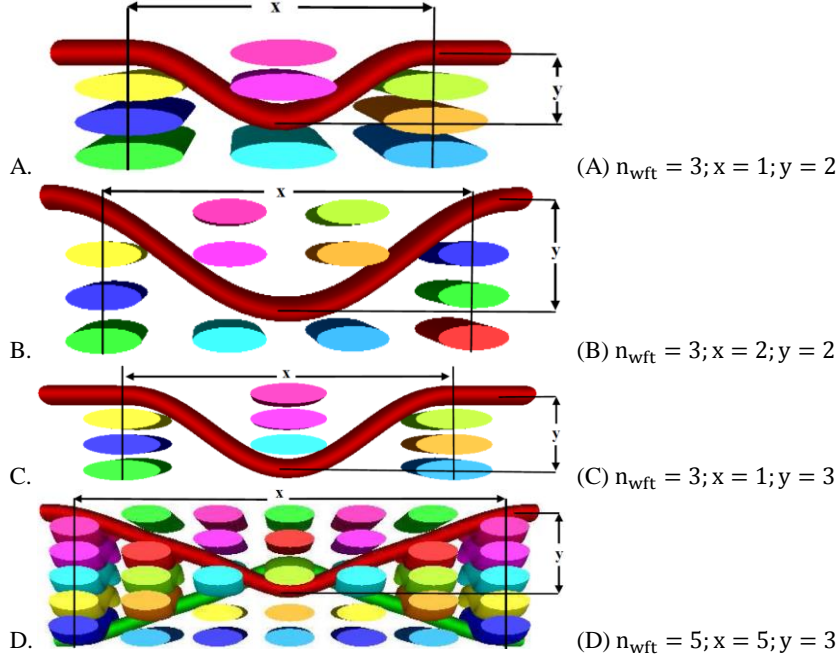


Figure 6. Définition des architectures interlocks en fonction du nombre de couches, du pas et de la profondeur de liage.

Par la suite, Nauman [2] et Cristian [32] ont pu établir que cette définition est valable pour la classe des tissus 3D interlocks chaines dont le liage dans l'épaisseur répond à une répétition constante telle que celle des armures de base. Un tissu 3D interlock chaîne peut être conçu pour correspondre à l'une de ces 4 classes de Hu [24]. A chacune de ces 4 classes peut être attribuée une valeur de pas  $x$ , de profondeur  $y$  et de nombre de couches  $n_{wft}$  telle que représentée au Tableau 1. Les variables  $x$ ,  $y$  et  $n_{wft}$  sont des entiers positifs et  $n_{wft} \geq 2$ , de telle sorte qu'une structure tissée 3D interlock chaîne possède au moins 2 couches de fils de trame.



Tableau 1. Description des différentes classes de tissus 3D interlocks chaines en fonction des valeurs de pas  $x$ , de profondeur de liaison des fils de chaîne  $y$  et du nombre de couches de fils de trame  $n_{wft}$ .

	Liage à travers l'épaisseur (Through the thickness) - T		Liage couche à couche (layer to layer) - L	
	Pas (step) - $x$	Profondeur (Depth) - $y$	Pas (step) - $x$	Profondeur (Depth) - $y$
Interlock d'Angle - A	$1 < x < \infty$	$y = n_{wft}$	$1 < x < \infty$	$2 \leq y < n_{wft}$
Interlock Orthogonal - O	$1 \leq x < \infty$	$y = n_{wft}$	$1 \leq x < \infty$	$2 \leq y < n_{wft}$

En considérant 5 couches de fils de trame ( $n_{wft} = 5$ ), 40 représentations différentes de tissus 3D interlocks chaines ont été réalisées en faisant varier le mode de liage des fils (la profondeur de liaison des couches, l'armure par couche, le pas de liaison des couches) [32].

Chaque variante a été affectée à l'une des 4 classes des tissus 3D interlocks chaines de la classification de Hu [24] que l'on retrouve représentées en Figure 7.

- Interlock A/ Liage T - Interlock d'angle avec liage dans l'épaisseur
- Interlock A/ Liage L - Interlock d'angle avec liage couche à couche
- Interlock O/ Liage T - Interlock orthogonal avec liage dans l'épaisseur
- Interlock O/ Liage L - Interlock orthogonal avec liage couche à couche

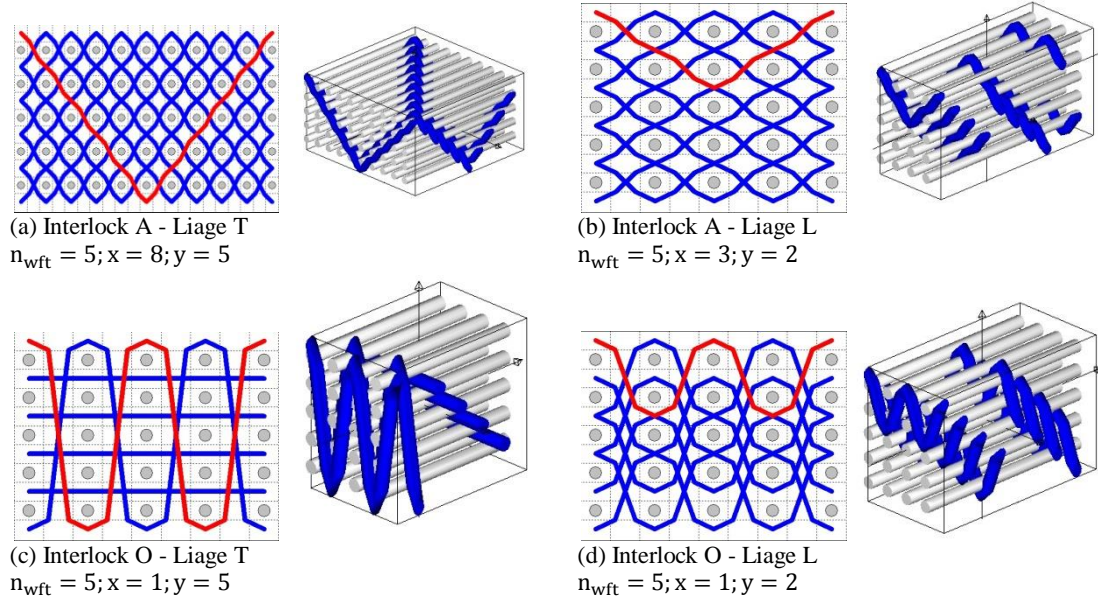


Figure 7. Représentation des 4 classes d'interlocks complétées des paramètres de liage.

Par la suite, Yi et Ding [31] ont proposé une méthode de description géométrique des architectures tissées 3D en utilisant des paramètres du procédé de fabrication. Cette méthode consiste à numéroté les fils de chaîne en fonction des cadres et les fils de trame en suivant l'ordre d'insertion de ces fils dans le tissu (Figure 8).

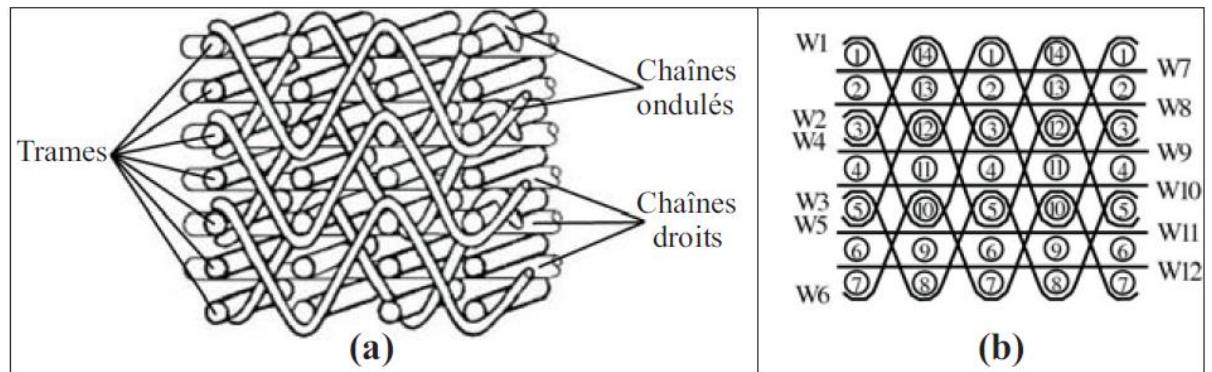


Figure 8. Numérotation des fils de chaîne et trame dans une armure de tissu 3D interlock chaîne : (a) Vue globale du type liage 3D; (b) Numérotation des fils de trame en coupe et des fils de chaîne de liage et renfort dans la représentation du liage 3D.

Les fils de chaîne dans une même section transversale sont groupés dans une ou plusieurs dents du peigne afin de minimiser les frottements des fils entre eux (Fig. 1.9). Dans ce cas, les fils de chaîne sont divisés en deux groupes : les fils de chaîne de liage {W1,W2,W3} représentés en Figure 9(a) et {W4,W5,W6} représentés en Figure 9(b); et le groupe des fils de chaîne de renfort {W7,W8,W9,W10, W11,W12} représentés en Figure 9(c).



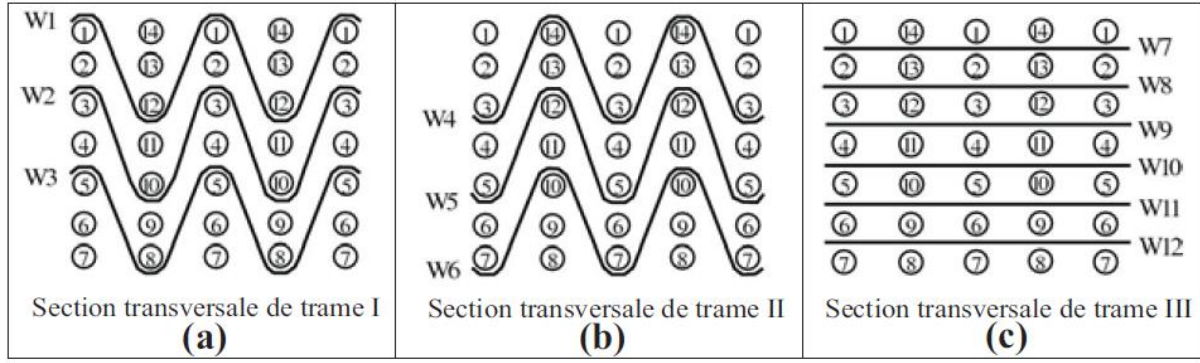


Figure 9. Représentation des différents groupes d'évolutions de fils de chaîne au sein d'une structure tissée 3D interlock chaîne.

Selon les résultats de Adanur et al. [33] et Tan et al. [34], la géométrie des préformes interlocks d'angle ou orthogonal dépend du nombre de couches entrelacées, du motif de répétition et de la présence de fils dans le plan.

Cependant, la classification de Hu [24] est valable uniquement en considérant une évolution constante des fils de chaîne de liage et n'inclut pas les évolutions non constantes, ni ne prend pas en compte les évolutions des fils de chaîne de renfort ou de surface.

En compilant l'ensemble de ces modes de représentation et classifications des tissus 3D interlocks chaînes, nous avons pu apporter un complément de classification fondée sur la représentation géométrique de la structure tissée 3D de base couplée aux contraintes de fabrication, notamment en terme de différence de consommation de fils de chaîne au sein d'un tissu 3D interlock chaîne [35]. L'amélioration que nous proposons consiste à intégrer indirectement les paramètres du procédé de fabrication et notamment en distinguant par classe les différences de longueur des fils de chaîne de surface, de liage ou de renfort, ce qui induit un système de régulation de tension des fils différent pour chaque classe identifiée.

## B. Amélioration de la classification actuelle des tissus 3D interlocks chaînes

Nous avons distingué les structures interlocks à consommation de fils de liage et/ou de renfort constante et de celle non constante. Pour la première catégorie, le nombre de couches entrelacées est constant et les fils de chaîne de liage suivent tous le même chemin ce qui engendre une consommation identique en longueur, telle que représentée en Figure 10.

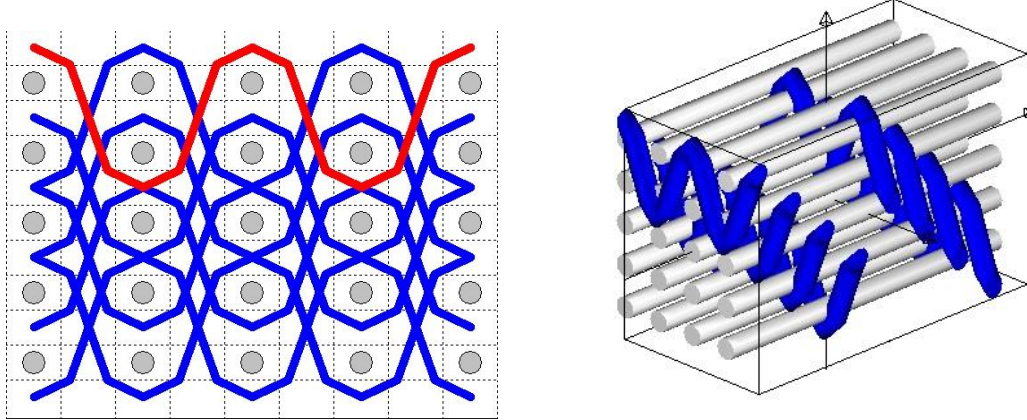


Figure 10. Représentation d'un tissu 3D interlock chaîne à consommation constante en longueur des fils de chaîne.

Pour la seconde catégorie, le nombre de couches entrelacées varie selon les fils de liage et/ou de renfort ce qui engendre une différence de consommation en longueur, telle que représentée en Figure 11.

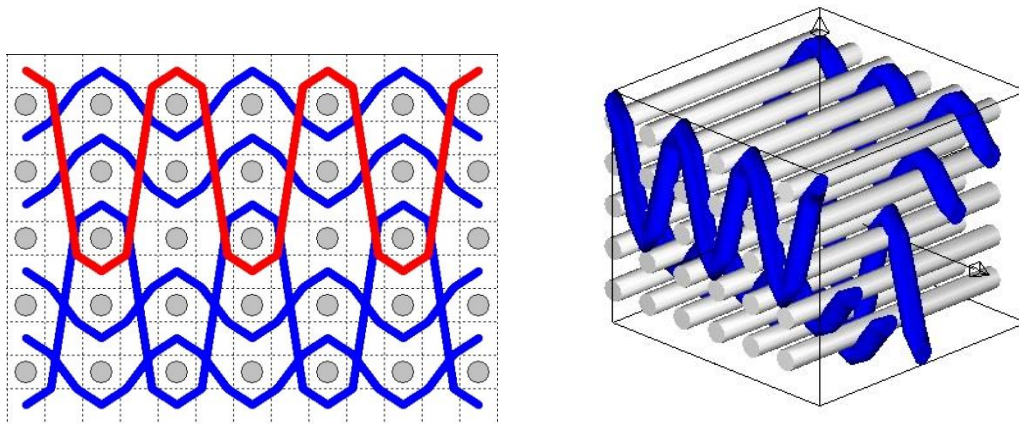


Figure 11. Représentation d'un tissu 3D interlock chaîne à consommation non constante en longueur des fils de chaîne.

Par la suite, nous avons fourni une définition précise de tout type de tissu 3D interlock chaîne par le biais de fiches techniques tissus [36]. Pour assurer une représentation complète d'un tissu 3D interlock chaîne, les principaux paramètres suivants doivent être définis :

- nombre de fils de chaîne de liage
- nombre de fils de chaîne de renfort
- nombre de fils de chaîne de surface
- nombre de couches de fils de trame
- les armures de base par couche
- la répartition minimale des types de fils de chaîne ou formule d'ourdissage
- la répartition minimale des types de fils de trame ou formule de tramage
- la densité des fils de chaîne de liage par unité de longueur (en cm)
- la densité des fils de chaîne de renfort par unité de longueur (en cm)
- la densité des fils de chaîne de surface par unité de longueur (en cm)
- la densité des fils de trame par unité de longueur (en cm)

Si l'on considère la représentation (Figure 12) du tissu 3D interlock chaîne à 4 couches de fils de trame, la disposition en angle des fils de chaîne de liage, liant à travers l'épaisseur du tissu selon une disposition d'armure en surface de type sergé de 8 effet trame cordon à droite, et intercalés de fils de renfort situés à chaque inter-couches du tissu; celui-ci appartient donc à la classe des tissus interlock A - liage T base sergé 8 effet trame cordon à droite.

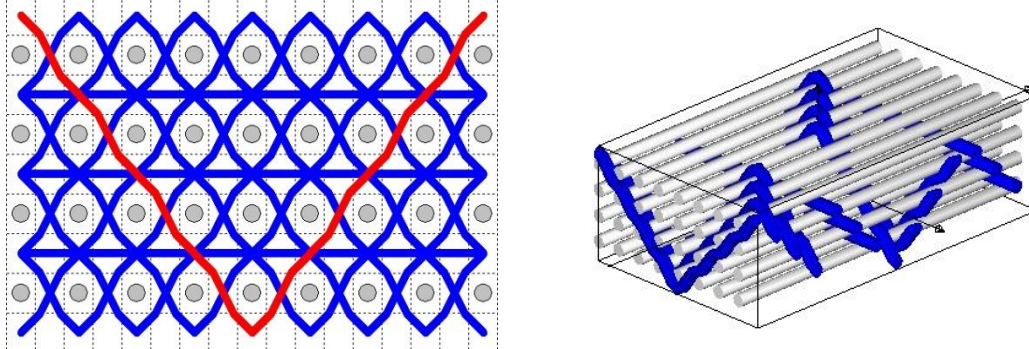


Figure 12. Représentation en coupe des fils de trame du tissu 3D interlock chaîne à 4 couches type interlock A - Liage T [36].

Le Tableau 2 répertorie l'ensemble des paramètres nécessaires pour définir précisément le tissu 3D interlock chaîne de type interlock A - Liage T base sergé de 8 effet trame cordon à droite.

Tableau 2. Tissu 3D interlock chaîne à consommation non constante en longueur des fils de chaîne [(dont 8 fils de chaîne de liage + 6 fils de chaîne de renfort) / 4 couches de fils de trame].

nombre de fils de chaîne de liage	8
nombre de fils de chaîne de renfort	6
nombre de fils de chaîne de surface	0
nombre de couches de fils de trame	4
les armures de base par couche (ici un sergé de 8 effet trame cordon à droite)	1
la répartition minimale des types de fils de chaîne ou formule d'ourdissage	1 fil de carbone 6k -Tex 223
la répartition minimale des types de fils de trame ou formule de tramage	1 fil de carbone 6k -Tex 223
la densité des fils de chaîne de liage par unité de longueur (en cm) ou par dent	4 fils chaîne liage/dent
la densité des fils de chaîne de renfort par unité de longueur (en cm) ou par dent	3 fils chaîne de renfort/dent
la densité des fils de chaîne de surface par unité de longueur (en cm) ou par dent	0 fil chaîne de surface/dent
la densité des fils de trame par couche et par unité de longueur (en cm)	2 fils trame/couche pour 1cm

A partir de cette définition des structures interlocks, nous avons pu classer précisément l'ensemble des tissus 3D interlocks chaines; cette même définition sera adoptée pour l'ensemble des structures utilisées dans la suite du document. Les travaux de recherche de Lapeyronnie [37] relatifs au comportement mécanique des structures 3D interlocks ont été structurés selon notre classification et définition des structures tissées monolithiques [35][36].

### C. Conclusion sur la classification des tissus 3D interlocks chaines

Fort de cette représentation géométrique des tissus, reconnue universellement par la théorie des armures, et sur la base de notre classification et définition précise des structures 3D interlocks chaines, nous avons pu définir l'ensemble des tissus 2D et 3D créés lors des différents projets de recherche. Cette représentation générale des tissus 3D interlocks chaines permet de concevoir les structures tissées en fonction des orientations possibles des fils de chaîne et trame et surtout permet de s'adapter aux paramètres du procédé de fabrication lors de l'étape de tissage.

## IV. Paramétrage des tissus 3D interlocks chaines

Dans le cadre de nos différents travaux de recherche [16][2][38][39][154], nous avons pu observer l'influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication du tissu 3D interlock chaîne sur la modification de la géométrie et du positionnement des fils au sein de la structure tissée, tels que: la position des fils de chaîne dans le peigne de la machine à tisser, l'ordre de sélection des fils de chaîne et trame, la densité des fils de chaîne et la géométrie de la structure tissée.

### A. Influence des paramètres de procédé de fabrication

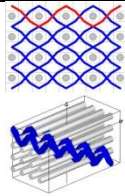
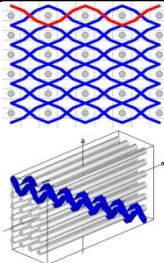
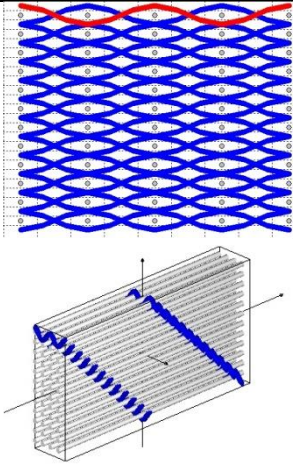
#### 1. Positionnement des fils de chaîne dans le peigne de la machine à tisser des tissus 3D interlocks chaines

Dans le cadre des travaux de recherche de Nauman [2], nous avons pu montrer l'influence des paramètres produits du tissu 3D interlock chaîne, couplée aux paramètres de procédé de fabrication, sur la géométrie finale des structures tissées et les formes de fils de chaîne et trame résultant de cette fabrication. A l'échelle mésoscopique, la forme de la section transversale du fil multi-filaments (dit mèche) est caractérisée par la structure initiale du fil multi-filaments ainsi que son chemin au sein de la structure tissée multi-couches dû aux différents mouvements des fils et actions mécaniques exercées lors du processus de sélection des fils de chaîne pour l'ouverture de la foule, de l'insertion du fil de trame et du tassage du fil de trame au plus près des liages précédents des fils de chaîne et trame [40].

Pour cela, trois tissus 3D interlocks chaines ont été réalisés dont les paramètres sont précisés dans le Tableau 3.

L'utilisation des fils de trame en verre R a permis une meilleure distinction avec les fils de chaîne en carbone lors des examens micrographiques des images des lamelles de tissus résinés et découpés selon les deux directions chaîne et trame.

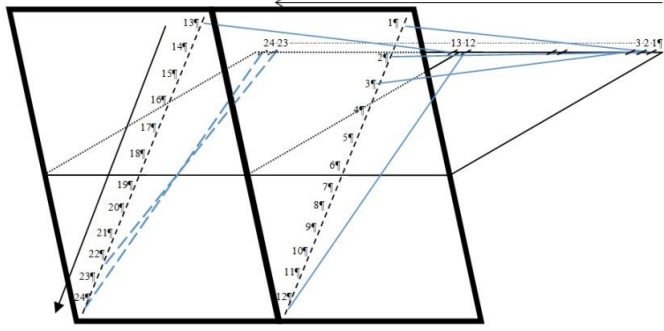
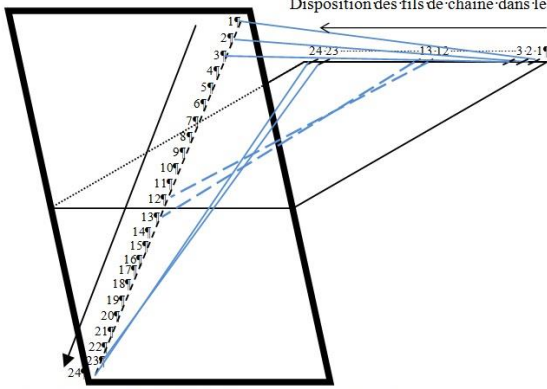
Tableau 3. Différentes architectures de tissu 3D interlock chaîne en liage couche à couche.

Paramètres tissu	Cas1; Interlock O - Liage L 1-1-4 base Toile	Cas 2; Interlock O - Liage L 1-1-6 base Toile	Cas 3; Interlock O - Liage L 1-1-12 base Toile
Fils de chaîne- Carbone	Tex 200 6K (IM7 GP)	Tex 200 6K (IM7 GP)	Tex 200 6K (IM7 GP)
Fils de trame Verre R	Tex 320 (RC 14 320 P109 160)	Tex 320 (RC 14 320 P109 160)	Tex 320 (RC 14 320 P109 160)
Laize tissu (cm)	37,5	18	37,5
Fils de chaîne/dent peigne	12	24	12
Réduction chaîne (fils/cm)	24	48	24
Épaisseur du tissu (mm)	3	4	7
Armure du tissu			

A chaque tissu, les paramètres du procédé de fabrication ont été adaptés tels que [2] :

- la répartition des fils de chaîne dans les dents du peigne (Tableau 4)
- l'ordre de sélection des fils de chaîne en fonction du type de liage

Tableau 4. Description du regroupement et ordre des fils de chaîne dans chaque dent de peigne pour les 3 tissus 3D interlocks chaînes.

Paramètres tissu	Ordre de passage des fils de chaîne dans les dents du peigne
Cas1; Interlock O - Liage L 1-1-4 Cas 3; Interlock O - Liage L 1-1-12	<p>Disposition des fils de chaîne dans le plan du tissu¶</p>  <p>Disposition des fils de chaîne dans les deux dents du peigne¶</p>
Cas 2; Interlock O - Liage L 1-1-6	<p>Disposition des fils de chaîne dans le plan du tissu¶</p>  <p>Disposition des fils de chaîne dans une dent du peigne¶</p>



Chacun des 3 tissus a été produit sur la même machine à tisser d'échantillonnage, puis résiné à froid pour fixer définitivement les structures et découpé en fines lamelles pour pouvoir être observées par le biais d'un microscope. Parmi l'ensemble des caractérisations effectuées, nous pouvons observer les vues en coupe des fils de chaîne de chacun des trois tissus représentés en Figure 13.

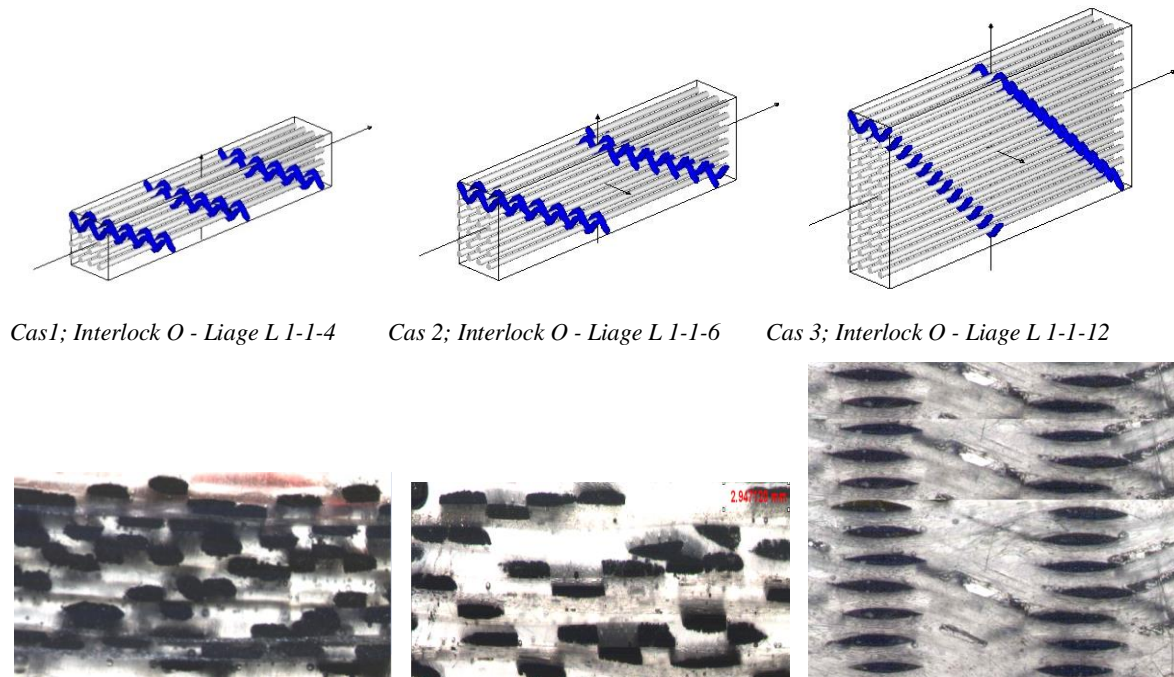


Figure 13. Images en coupe des fils de chaîne dans le sens des fils de trame des 3 tissus 3D interlocks chaînes.

Dans le Cas 1, les fils de chaîne du tissu Interlock O - Liage L 1-1-4 disposent d'espace suffisant dans chaque dent de peigne et sont donc positionnés diagonalement dans le tissu car la sélection des fils de chaîne s'effectue alternativement à chaque insertion de fil de trame, ce qui permet de reproduire un tissage couche après couche. Les contraintes latérales exercées sur les fils de chaîne par les dents du peigne couplées au mode de sélection des fils de chaîne conduit à une forme de section rectangulaire des fils de chaîne.

Dans le Cas 2; les fils de chaîne du Interlock O - Liage L 1-1-6 ont vu leur espace disponible dans chaque dent du peigne réduit de moitié par rapport au précédent tissu et ont donc conduit au même résultat que précédemment en terme de disposition diagonale des fils de chaîne tout en augmentant les contraintes latérales exercées sur les fils de chaîne, ainsi que les frottements entre fils. La section des fils de chaîne rendue quasiment rectangulaire et plane de chaque côté du fil démontre un fort taux de compaction du fil dans la structure tissée.

Dans le Cas 3; la sélection des fils de chaîne du tissu Interlock O - Liage L 1-1-12 a été réalisée selon la méthode préconisée par Yi et Ding [31], ce qui permet de positionner les mêmes évolutions des fils de chaîne au sein d'une même dent de peigne, ce qui permettra un positionnement de ces fils de chaîne, alignés les uns au dessous des autres, par colonne de sélection. Cette technique de sélection couplée au positionnement des fils de chaîne dans les dents du peigne conserve la section initiale de forme lenticulaire des fils de chaîne de carbone disposés sur la machine à tisser. Par cette technique de tissage, les fils de chaîne subissent moins de frottement entre eux.

## 2. Ordre de sélection des fils de chaîne et trame des tissus 3D interlocks chaînes

Dans le cadre des travaux de recherche de Chevalier [41], nous avons réalisé deux tissus 3D interlocks chaînes fondés sur la même architecture de type Interlock O - Liage L 1-2-7 base Toile avec respectivement, des fils de chaîne de surface et un ordre d'insertion des fils de trame de haut en bas pour la première colonne puis de bas en haut pour la colonne suivante (insertion type "U") (Figure 14), sans fils de chaîne de surface et suivant un ordre d'insertion des fils de trame de haut en bas pour la première colonne et le même ordre pour la colonne suivante (insertion type "N" inversé) (Figure 15).

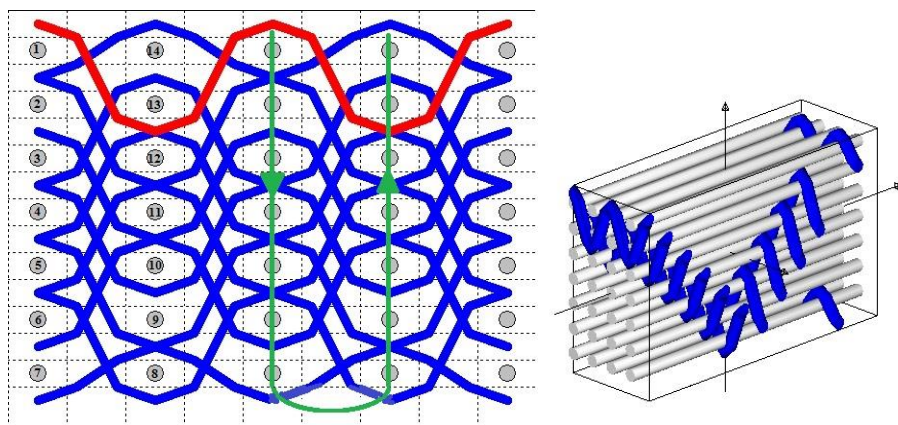


Figure 14. Représentation tissu Interlock O -L liage 1-2-7 avec des fils de chaîne de surface en insertion des fils de trame de type "U" (gauche) et en vue 3D dans l'ordre de sélection des fils de chaîne (droite).

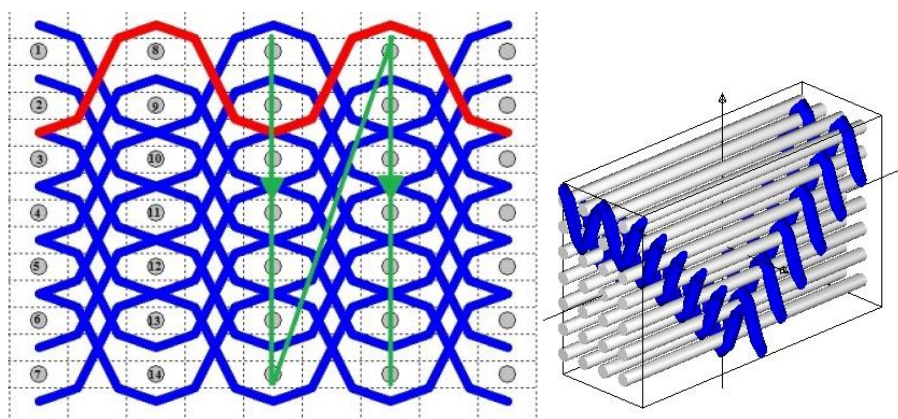


Figure 15. Représentation du tissu Interlock O -L liage 1-2-7 avec insertion des fils de trame de type "N" inversé (gauche) et en vue 3D dans l'ordre de sélection des fils de chaîne (droite).

Nous pouvons observer (Figure 16), sur les vues en coupe des sections des fils de trame des deux types de tissus résinés interlock O -Liage L 1-2-7, une différence de position des fils de trame conduisant à des zones de vides (3) mais aussi des zones de forte concentration de contraintes (1 et 2). L'ordre de sélection des fils de chaîne et trame influence directement la géométrie du tissu Interlock O - Liage L 1-2-7.

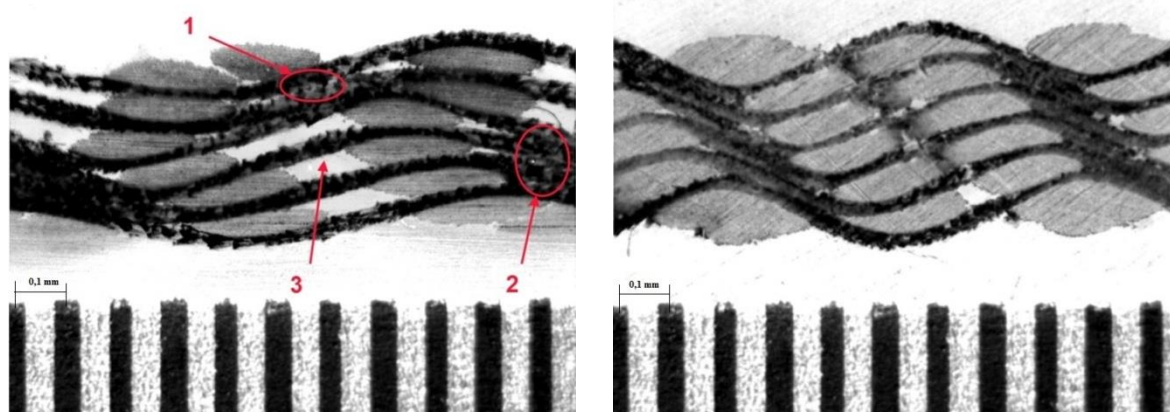


Figure 16. Vue en coupe de la section des fils de trame des tissus Interlock O - Liage L 1-2-7 (gauche) avec des fils de chaîne de surface et une insertion des fils de trame de type "U" et (droite) sans fils de chaîne de surface et une insertion des fils de trame de type "N" inversé.

## B. Influence des paramètres de produit

### 1. Densité des fils de chaîne des tissus 3D interlocks chaînes

Sur la base du même tissu Interlock O - Liage L 1-2-7 [41] et des mêmes fils para-aramide 1680 dTex, nous avons réalisé 4 structures tissées avec différentes densités des fils de chaîne et trame (Figure 17 - Figure 18).

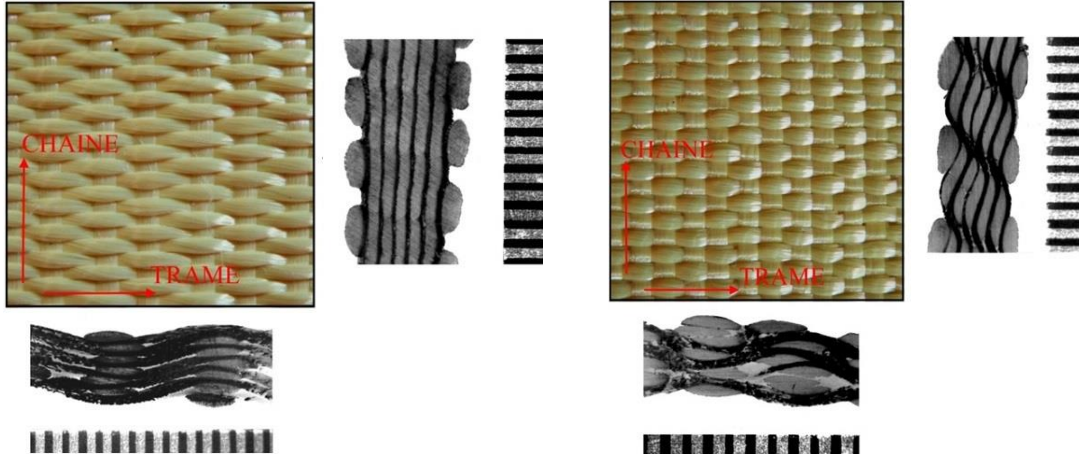


Figure 17. Représentation des vues en coupe des fils de chaîne (sur le côté droit de l'image du tissu) et trame (en bas de l'image du tissu) des tissus Interlock O -Liage L 1-2-7 avec 18 fils chaînes/cm - 80 fils trames/cm (gauche) et 30 fils chaînes/cm - 56 fils trames/cm (droite).

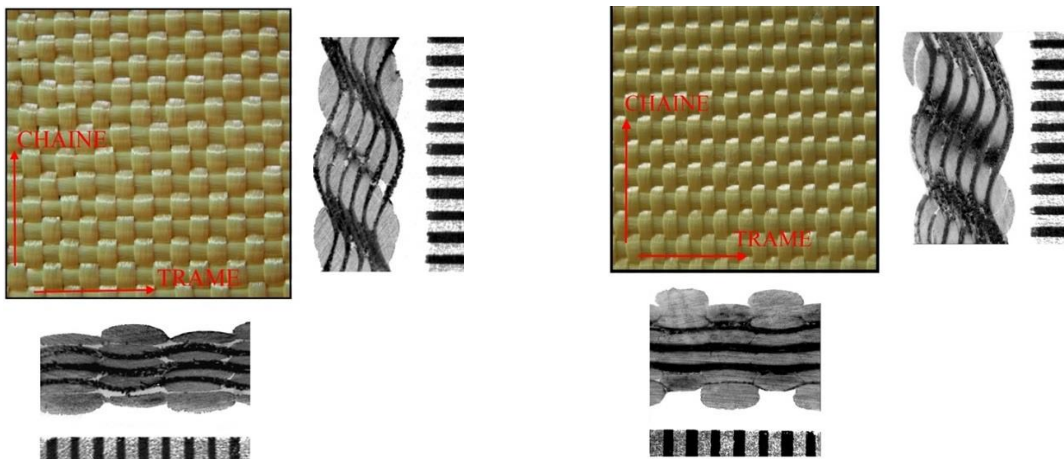


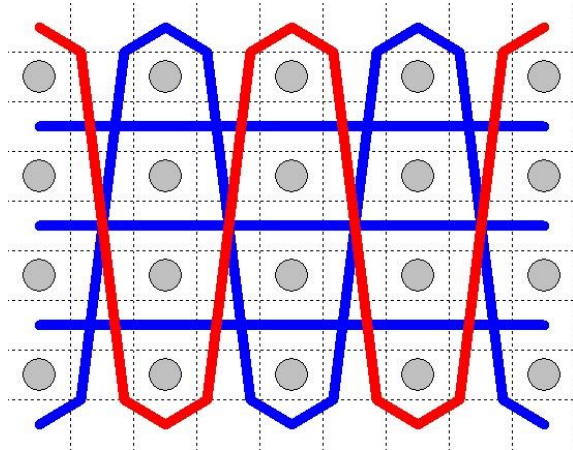
Figure 18. Représentation des vues en coupe des fils de chaîne (sur le côté droit de l'image du tissu) et trame (en bas de l'image du tissu) des tissus Interlock O -Liage L 1-2-7 avec 42 fils chaînes/cm - 42 fils trames/cm (gauche) et 60 fils chaînes/cm - 37 fils trames/cm (droite).

Nous pouvons observer que l'augmentation de la densité des fils de chaîne (ou des fils de trame) au sein de la même structure tissée réduit l'espace entre les fils de chaîne (ou les fils de trame) et contribue à passer par différentes formes de section du fil de chaîne (ou du fil de trame) de type lenticulaire très aplatie (18 fils chaînes/cm - 80 fils trames/cm), à elliptique (30 fils chaînes/cm - 56 fils trames/cm et 42 fils chaînes/cm - 42 fils trames/cm) jusqu'à rectangulaire (60 fils chaînes/cm - 37 fils trames/cm). Les variations de densité des fils de chaîne et trame influent sur les positions et formes des fils, ce qui induit des différences d'homogénéité de la structure tissée pouvant être classées en trois catégories: faible (Interlock O -Liage L 1-2-7 (18 fils chaînes/cm - 80 fils trames/cm)), moyenne (Interlock O -Liage L 1-2-7 (30 fils chaînes/cm - 56 fils trames/cm) et Interlock O -Liage L 1-2-7 (42 fils chaînes/cm - 42 fils trames/cm)) et forte (Interlock O -Liage L 1-2-7 (60 fils chaînes/cm - 37 fils trames/cm)).

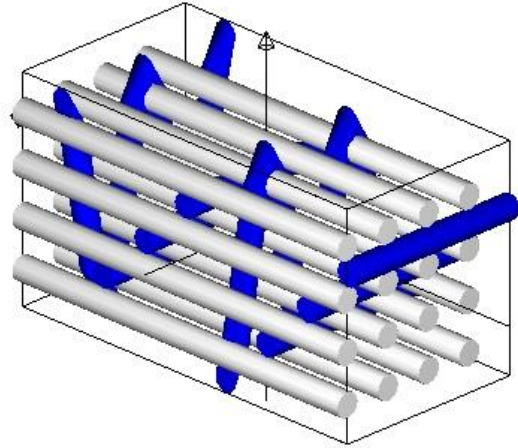


## 2. Architecture des tissus 3D interlocks chaines

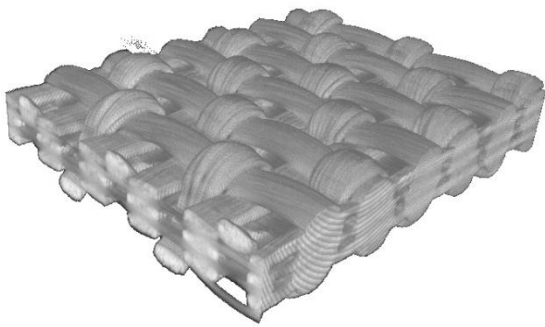
Dans le cadre des travaux de recherche de Vilfayau [38] et Florimond [39], nous avons pu observer les géométries de tissus 3D interlocks chaines par le biais d'images tomographiques à base de fils de verre E en chaîne et trame de 900 Tex. Les différentes observations en coupe effectuées dans les deux directions des structures tissées ont permis de révéler l'influence du type de liage couplée aux paramètres du tissu, tels que la densité des fils par unité de longueur (réductions chaîne et trame) et le titrage des fils de chaîne et trame, sur les formes géométriques résultantes des fils de chaîne et trame.



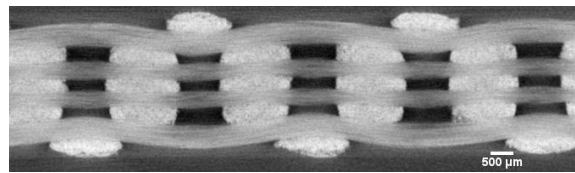
Représentation géométrique en coupe des fils de trame



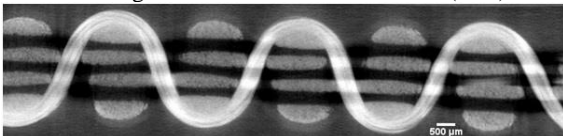
Représentation géométrique 3D (évolution des fils de chaîne)



Vue 3D du liage 4 couches avec fils de renfort (toile)



Vue en coupe des fils de chaîne (évolution des fils de trame)



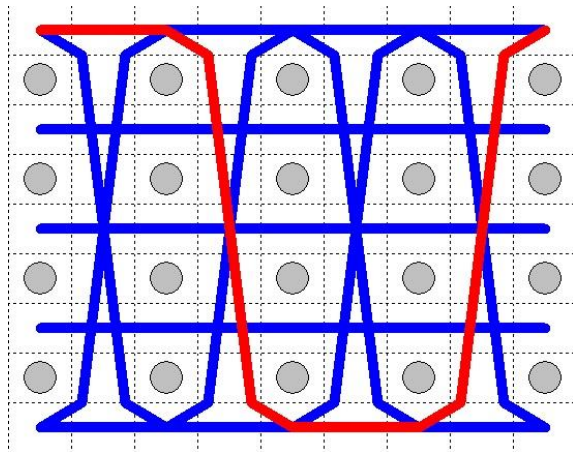
Vue en coupe des fils de trame (évolution des fils de chaîne)

Figure 19. Images tomographiques du tissu Interlock O - Liage T 1-4-4 avec fils de renforts (base armure toile).

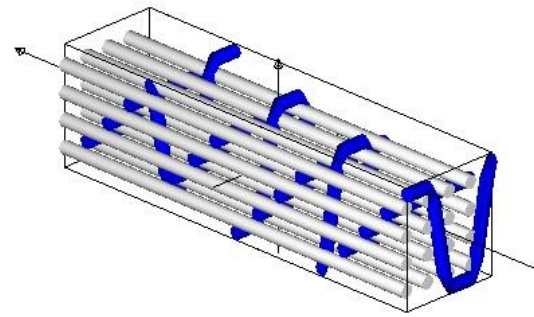
La vue en coupe des fils de trame présente une forme elliptique pour la section des fils de chaîne se trouvant au niveau des surfaces extérieures, alors que les fils présents dans l'épaisseur du renfort présentent une section quasi-rectangulaire, due aux contacts générés par l'encastrement des fils de renfort au milieu de la structure. En effet, les fils de chaîne ont un placement dans l'espace qui est constant puisque ces fils sont repartis régulièrement dans les broches du peigne de la machine à tisser. Les colonnes de fils de chaîne sont donc contraintes dans le sens trame et une tension est appliquée sur ces fils lors du tissage dans la direction de l'épaisseur.

En considérant les mêmes conditions du procédé de production, nous avons pu réaliser un autre type de liage entre les fils de chaîne et de trame reposant sur l'armure croisé 2-2 (Figure 20).

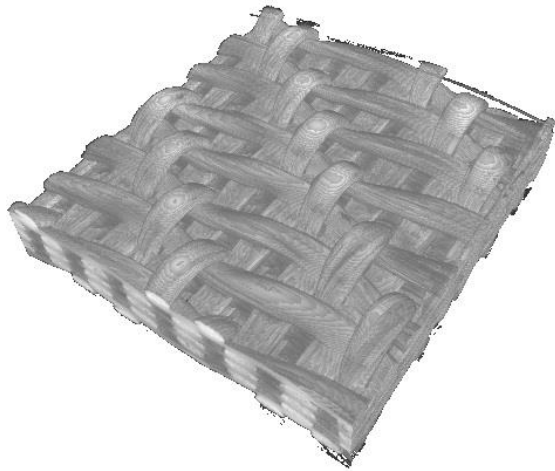




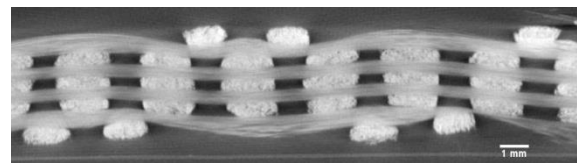
Représentation géométrique en coupe des fils de trame



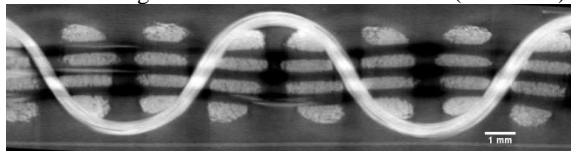
Représentation géométrique 3D (évolution des fils de chaîne)



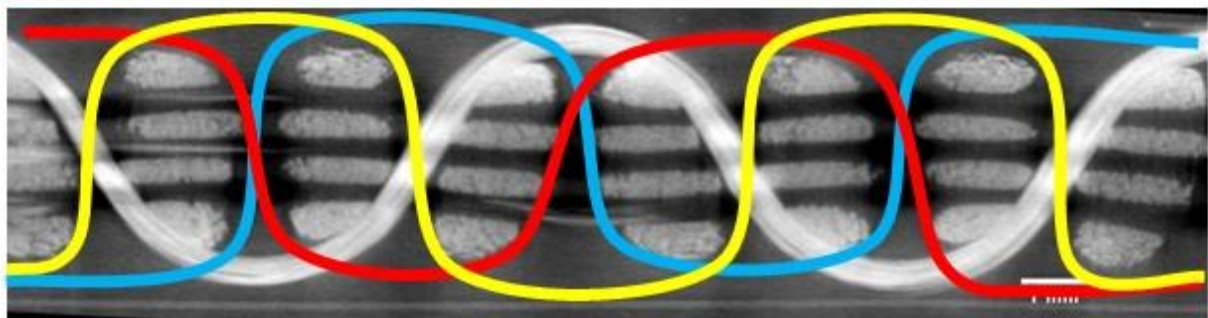
Vue 3D du liage 4 couches avec fils de renfort (croisé 2-2)



Vue en coupe des fils de chaîne (évolution des fils de trame)



Vue en coupe des fils de trame (évolution des fils de chaîne)



Superposition des trajectoires des fils de chaîne de liage dans le tissu

Figure 20. Images tomographiques du tissu Interlock O - Liage T 2-4-4 avec fils de renforts (base armure croisé 2-2).

En considérant l'évolution des fils de chaîne de liage, nous pouvons constater que la section des fils de trame évolue au sein même de la structure en fonction des tensions appliquées principalement en périphérie de la structure plutôt qu'en son coeur. La superposition des fils de chaîne de liage révèlent les différentes formes de section de fils de trame obtenues à partir des fils de liage et surtout le côté aléatoire de la section obtenue dépendant des valeurs locales liées à la disposition dans l'espace de la structure. Ainsi, la sensibilité de l'évolution des sections des fils de trame lors de leur insertion, effectuée de manière quasi-répétitive via les différents éléments de la machine à tisser sensés reproduire les mêmes mouvements et positionnement des fils, semble importante et dépendante des paramètres suivants: tension locale des fils de liage en contact avec le fil de trame, valeur de ténacité locale du fil et écart de positionnement au sein de la structure tissée.

En considérant le liage de type Interlock A - Liage T 7-4-4 avec fils de renfort (base armure satin 8), le positionnement plus espacé du fil de liage au sein de la structure tissée doit alors générer moins de modification de forme de sections au sein de la structure tissée (Figure 21).

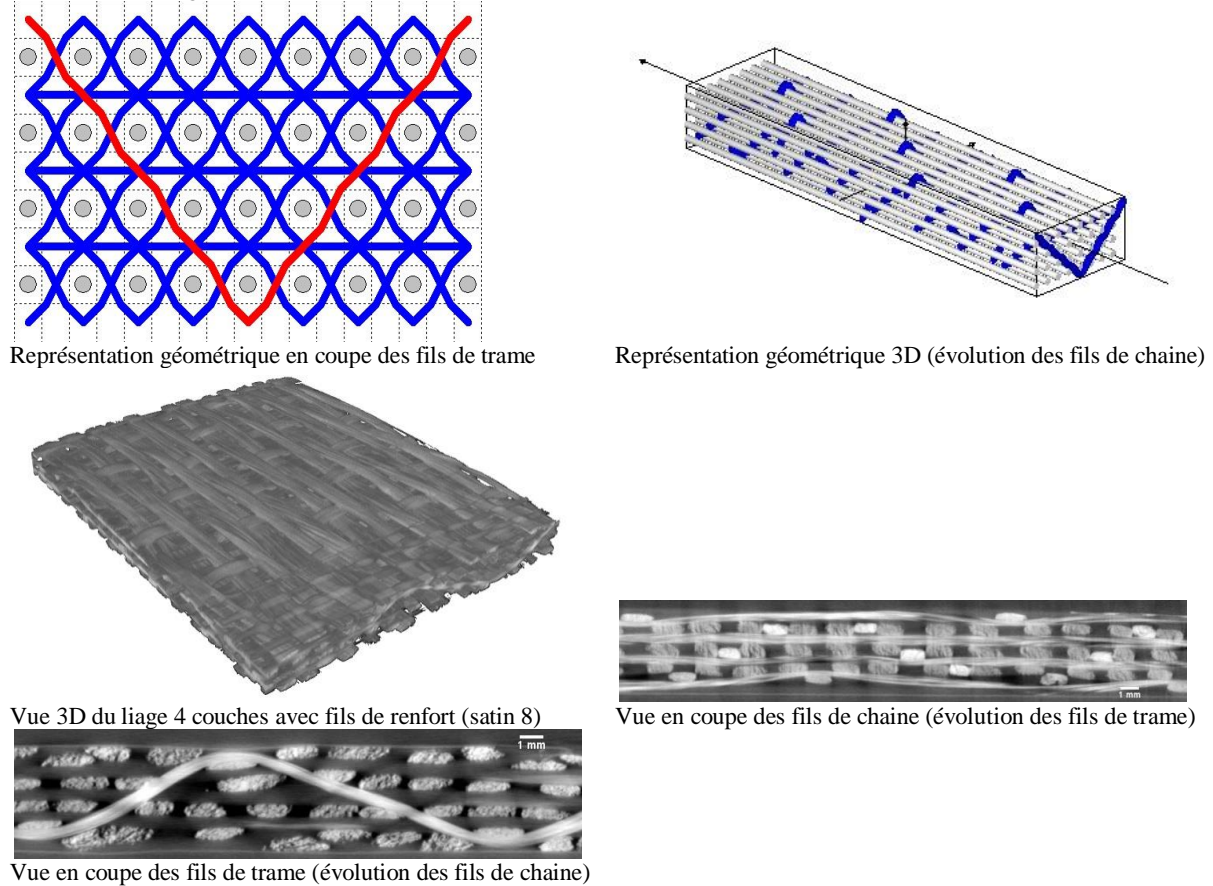


Figure 21. Images tomographiques du tissu Interlock A - Liage T 7-4-4 avec fils de renfort (base armure satin 8).

Les sections transverses des fils de chaîne et trame ont des géométries différentes selon l'endroit où ils se trouvent dans la structure. Par ailleurs, on observe que les fils de trame superposés ne restent généralement pas dans le même plan, ou encore qu'un même fil peut avoir une forme de section différente selon sa position dans le renfort (Figure 22). Les sections peuvent être elliptiques, très aplaties ou encore rectangulaires. La géométrie des sections de fil de trame dans un tissu 3D interlock chaîne est très fortement influencée par l'évolution des fils de chaîne en contact avec eux. Les fils de trame sont insérés avec une légère tension lors du tissage, puis ne la subissent plus lorsqu'ils sont complètement relâchés lors de la fermeture de la foule. Ils ont donc plus de possibilité de se déformer, puisque selon leur placement dans la structure, ils seront en contact avec plus ou moins de fils de chaîne ayant des évolutions différentes.

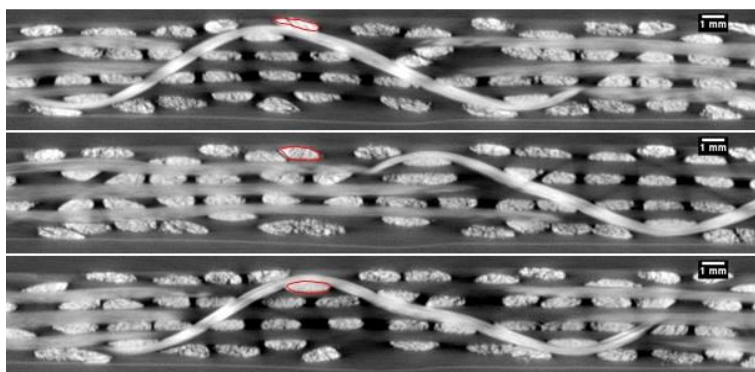


Figure 22. Évolutions successives de la section d'un même fil de trame localisé à trois positions différentes en fonction des vues en coupe de la structure tissée 3D interlock chaîne.

### 3. Pas et profondeur de liage de l'architecture des tissus 3D interlocks chaines

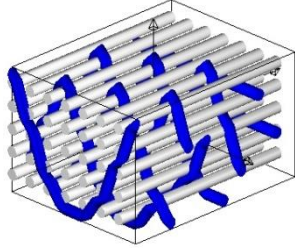
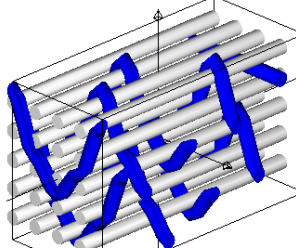
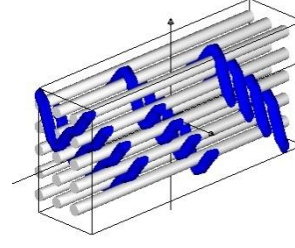
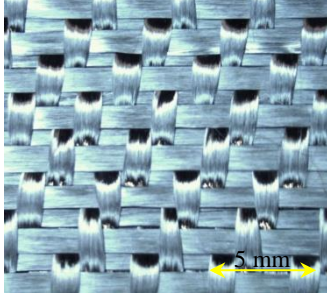
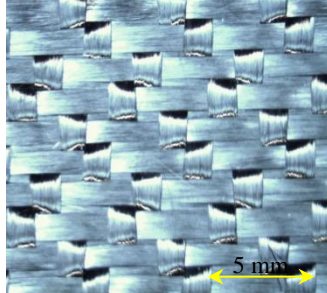
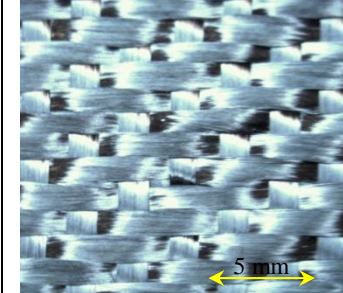
Nous avons également entrepris dans le cadre des travaux de recherche de Nauman [2], de montrer la relation entre les paramètres produits, de pas et de profondeur de liage d'une géométrie d'un type de tissu 3D interlock chaîne, et les propriétés mécaniques qui en découlent.

Pour cela, nous avons décliné un tissu 3D interlock chaîne de type d'angle en 5 couches, avec des fils de carbone (6K) de type IM7 ( $\rho = 1,75 \text{ g/cm}^3$ ) en 223 Tex en chaîne et trame, avec les réductions de 16 fils de chaîne de liage/cm ( $R_{CT}$ ) et 25 fils de trame/cm ( $R_{tT}$ ), en trois architectures différentes [42][43] avec des valeurs de pas et de profondeur de liage différentes (Tableau 5).

Afin de conserver les mêmes valeurs des réductions chaines pour les 3 types d'architectures de tissus, 4 fils de chaîne ont été positionnés au sein de chaque broche du peigne de la machine à tisser [44].

Les trois architectures sélectionnées permettent de lier graduellement les fils de chaîne de liage dans l'épaisseur du tissu.

Tableau 5. Paramètres des tissus interlock A à base de fils de carbone 6k IM7 - 223 Tex

Interlock A	Liage T 5-5-5 base satin 7 effet trame décochement 2	Liage L 3-3-5 base satin 4 effet trame	Liage L 2-2-5 sergé 3 effet trame cordon à droite
Pas des fils de chaîne de liage	5	3	2
Profondeur des fils de chaîne de liage	5	3	2
Représentation géométrique 3D (évolution des fils de chaîne)			
Vue de la surface des tissus interlocks			

#### a) Caractérisation mécanique des tissus 3D interlocks chaines non résinés

Différentes mesures ont été effectuées sur 10 échantillons de chacune de ces trois architectures de tissus 3D interlocks chaines telles que: l'embuvage (E) des fils de chaîne, le retrait (R) des fils de trame et l'épaisseur (T) du tissu. Les valeurs de masse surfacique (MS) et de fraction volumique de fibres (FVF) de chaque tissu ont été calculées à partir de valeurs mesurées précédentes et suivant les équations (Équation 1) et (Équation 2).

$$\text{Équation 1} \quad MS = \left\{ \sum_{i=1}^N \left[ \frac{R_{CT}(i)}{1000} \times \frac{Tex(i)}{\left(1 - \frac{E(i)}{100}\right)} \right] + \sum_{j=1}^P \left[ \frac{R_{tT}(j)}{1000} \times \frac{Tex(j)}{\left(1 - \frac{R(j)}{100}\right)} \right] \right\} \times 100$$

avec :

N: Nombre de type de fils de chaîne

$R_{CT}(i)$ : Réduction des fils chaîne de type i du tissu (fils/cm)

$Tex(i)$ : Titrage du fil de chaîne de type i (Tex)

$E(i)$ : embuvage du fil de chaîne de type i (%)

P: Nombre de type de fils de trame

$R_{tT}(j)$ : Réduction des fils de trame de type j du tissu (fils/cm)

$Tex(j)$ : Titrage du fil de trame de type j (Tex)

$R(j)$ : retrait du fil de trame de type j (%)



$$\text{Équation 2} \quad FVF = \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{1}{\rho(i)} \times \left[ \frac{R_{cr}(i)}{1000} \times \frac{Tex(i)}{\left(1 - \frac{E(i)}{100}\right)} \right] + \sum_{j=1}^P \frac{1}{\rho(j)} \times \left[ \frac{R_{tr}(j)}{1000} \times \frac{Tex(j)}{\left(1 - \frac{R(D)}{100}\right)} \right] \right\} \times \frac{1}{1000 \times T} \times 100$$

avec :

$\rho(i)$ : masse volumique des fils de chaîne de type i (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho(j)$ : masse volumique des fils de trame de type j (g/cm<sup>3</sup>)

T: épaisseur du tissu (mm)

Tableau 6. Caractéristiques mesurées et calculées des différentes architectures des tissus 3D interlocks chaînes [45].

Caractéristiques du tissu	Unité	Interlock A	Liage T 5-5-5	Liage L 3-3-5	Liage L 2-2-5
Embuvement (E)	%	Chaîne	5,1	3,5	1,6
Retrait (R)	%	Trame	0,7	0,7	1,0
Épaisseur (T)	Mm	Tissu	2,3	1,7	2,0
Masse surfacique (MS)	g/m <sup>2</sup>	Tissu	936,4	930,9	925,6
Fraction volumique de fibres (FVF)	%	Tissu	23,2	31,0	26,6

Nous pouvons constater qu'à masse surfacique équivalente des différents liages du tissu d'interlock d'angle, la fraction volumique de fibres du liage L 3-3-5 est plus importante en raison de sa valeur plus faible en épaisseur. Nous pouvons expliquer ce phénomène par le fait que le liage L 3-3-5 possède suffisamment de fils de chaîne de liage dans l'épaisseur permettant de mieux répartir les efforts mécaniques aux points de contact entre les fils de chaîne et trame, et donc permettre une compression des fils dans le sens de l'épaisseur du tissu par l'espace restant disponible. Contrairement au liage L 2-2-5 où le nombre trop important de fils de chaîne de liage dans l'épaisseur bloque tout effort de compression des fils et donc ne réduit pas l'épaisseur totale du tissu [46].

Ce phénomène de compression des fils de chaîne de liage et trame insérés apparaît donc plus prononcé en observant les images tomographiques en coupe des sections des fils de trame du tissu interlock d'angle pour le liage L 3-3-5 que pour le liage T 5-5-5 (Figure 23).

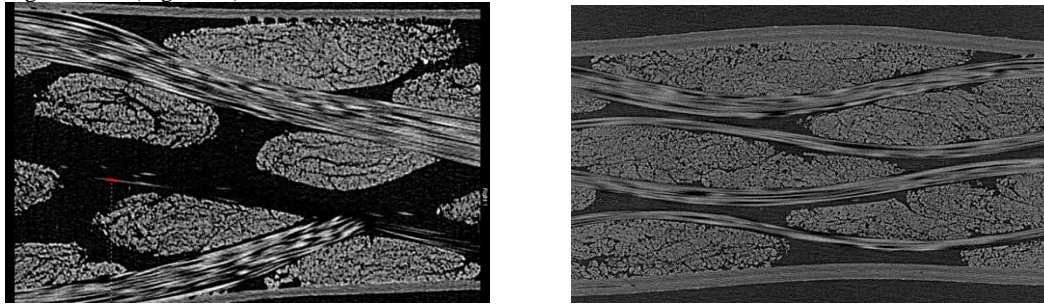


Figure 23. Images tomographiques en coupe des fils de trame du tissu Interlock A - Liage T 5-5-5 (gauche) et Liage L 3-3-5 (droite).

Des essais de caractérisation mécanique, de type traction à vitesse quasi-statique (5 mm/min = 0,083 × 10<sup>-3</sup> m/s) sur machine ZWICK 1474 suivant la norme NF ISO 4606 [47] relatifs aux tissus de verre non résinés, sur un minimum de 5 éprouvettes (2,5 cm de large x 25 cm de haut) par type de liage des tissus 3D interlocks carbones d'angle, ont été réalisés (Tableau 7).

Tableau 7. Caractéristiques mécaniques en traction quasi-statique des tissus 3D interlocks carbones d'angle pour les trois types de liage.

Interlock A	Contrainte à rupture [MPa]		Allongement à rupture [%]		Force maximale à rupture [N]	
	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame
Liage T 5-5-5	194,2	412,7	7,2	2,9	11166,6	23731,4
Liage L 3-3-5	368,0	471,8	8,0	2,7	15638,5	20053,3
Liage L 2-2-5	345,7	519,0	2,6	3,7	17285,4	25947,8

Les valeurs de contraintes à rupture dans le sens trame sont plus importantes pour les 3 types de liage que dans le sens chaîne en raison de la densité en fils de trame (25 fils/cm) plus grande que la densité en fils de chaîne (16 fils/cm), ainsi que la dégradation des fils de carbone plus importante dans le sens chaîne que dans le sens au cours du procédé de tissage.

Il peut être constaté également une corrélation importante des valeurs d'allongements des liages et des valeurs d'embuvement et de retrait des fils de chaîne et trame dans les deux directions du tissu pour les trois types de liage. Un comportement tout à fait spécifique des structures tissées 3D interlocks dans le sens chaîne peut être observé, montrant ainsi l'influence du type de liage sur la capacité à se déformer par un réaligement des fils de chaîne de liage soumis à une contrainte de traction plus ou moins prononcée en fonction de la profondeur et du pas de liage des types d'architecture [48].

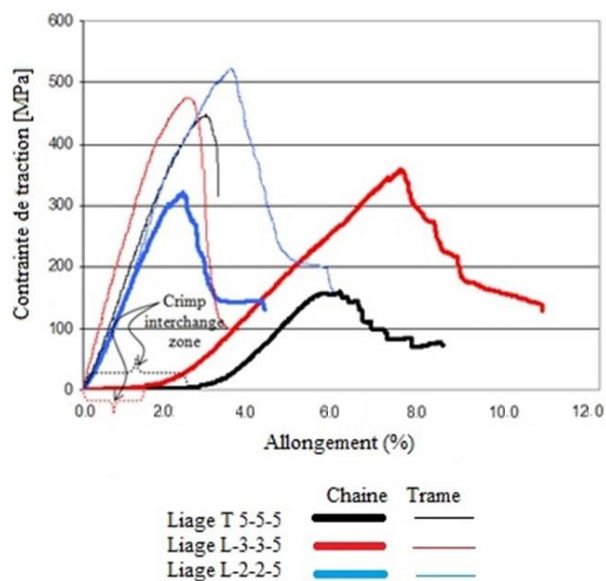


Figure 24. Courbes de traction-allongement dans les sens chaîne et trame pour les trois types de liage du tissu interlock d'angle.

Ce comportement spécifique de grande déformation sous faible contrainte en début de sollicitation s'applique pour les trois types de liage de l'architecture interlock, de façon plus ou moins nuancée, pour une structure tissée non résinée. Par la suite, nous avons souhaité vérifier si ce même comportement spécifique pouvait se reproduire, de manière plus ou moins prononcée, pour les trois types de liage des tissus interlocks imprégnés de résine de type époxy (référence EPOLAM 5015 - Densité à 25°C (ISO 1675:1985) = 1,15 g/cm<sup>3</sup> [49]) sous procédé d'infusion de type VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding).

Après imprégnation, nous avons vérifié, par une observation visuelle en coupe des sections des fils de chaîne et trame au sein de chaque liage des tissus 3D interlocks chaînes, si cette étape de consolidation n'avait pas modifié les dimensions et dispositions dans l'espace de la géométrie initiale de la structure tissée non résinée (Tableau 8).

Tableau 8. Images tomographiques en coupe des sections des fils de trame montrant l'évolution des fils de chaîne (colonne de gauche) et en coupe des sections des fils de chaîne montrant l'évolution des fils de trame (colonne de droite) des tissus résinés Interlock A-liage T 5-5-5, liage L 3-3-5 et liage L 2-2-5.

Interlock A résiné	Vue en coupe des fils de trame (évolution des fils de chaîne)	Vue en coupe des fils de chaîne (évolution des fils de trame)
Liage T 5-5-5		
Liage L 3-3-5		
Liage L 2-2-5		

Nous pouvons observer que globalement les évolutions des fils de chaîne au sein de chaque type de liage des tissus résinés interlocks sont identiques à celles des tissus non résinés.

## b) Caractérisation mécanique des tissus 3D interlocks chaînes résinés

Différentes mesures ont été effectuées (Tableau 8) sur 10 échantillons de chacune des trois architectures de tissus résinés 3D interlock chaîne telles que: l'épaisseur (Tr) du tissu et la masse surfacique (MSr). Le calcul de la fraction volumique de fibres dans le tissu résiné repose sur les calculs de la norme ASTM D3171-09 [50]

Tableau 9. Caractéristiques mesurées et calculées des différentes architectures des tissus interlocks résinés

Caractéristiques du tissu résiné	unité	Interlock A	Liage T 5-5-5	Liage L 3-3-5	Liage L 2-2-5
Épaisseur (Tr)	mm	Tissu résiné	1,45	1,50	1,70
Masse surfacique (MSr)	g/m <sup>2</sup>	Tissu résiné	1741,6	1833,1	2088,8
Fraction volumique de fibres (FVFr)	%	Tissu résiné	36,3	34,8	31,0

Des essais de caractérisation mécanique, de type traction à vitesse quasi-statique ( $5 \text{ mm/min} = 0,083 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ) sur machine ZWICK 1474, suivant la norme NF ISO 527-4 [51] relatif aux composites plastiques renforcés de fibres orthotropes, pour un minimum de 5 éprouvettes (2,5 cm de large x 25 cm de haut) par type de liage des tissus interlocks résinés, ont été réalisés (Tableau 10) [52].

Tableau 10. Caractéristiques mécaniques en traction quasi-statique des tissus interlocks carbonés d'angle résinés pour les trois types de liage.

Interlock A résiné	Contrainte à rupture [MPa]		Allongement à rupture [%]		Force maximale à rupture [N]		Module de Young [GPa]	
	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame
Liage T 5-5-5	223,9	386,1	0,6	0,2	8117,6	13995,9	53,2	106,2
Liage L 3-3-5	245,6	450,6	1,3	0,3	9210,1	16896,6	36,7	136,6
Liage L 2-2-5	299,4	527,6	0,7	0,8	12722,6	22424,0	53,0	104,6

Nous pouvons constater par les valeurs d'allongement à rupture dans les sens chaîne et trame que l'apport de résine au sein de chaque type de liage des tissus interlock d'angle a indéniablement rigidifié les renforts tissés, et donc contribué également à l'augmentation des valeurs des forces maximales à rupture, des contraintes à rupture et des modules de Young.

Nous pouvons observer (Figure 25) que le phénomène d'allongement important sous faible sollicitation mécanique des tissus interlocks pour les trois types de liage est également atténué par l'apport de la résine, tout en se différenciant par rapport au comportement dans le sens trame. Ce phénomène atténué s'explique par la contribution de la résine dans la stabilisation de la géométrie du liage interlock reportant ainsi les efforts sur les fils résinés. Cependant, nous conservons une capacité d'allongement dans le sens chaîne pour le liage L 3-3-5 plus importante que les autres liages des tissus résinés; ce que nous pouvons également observer pour les tissus non résinés.

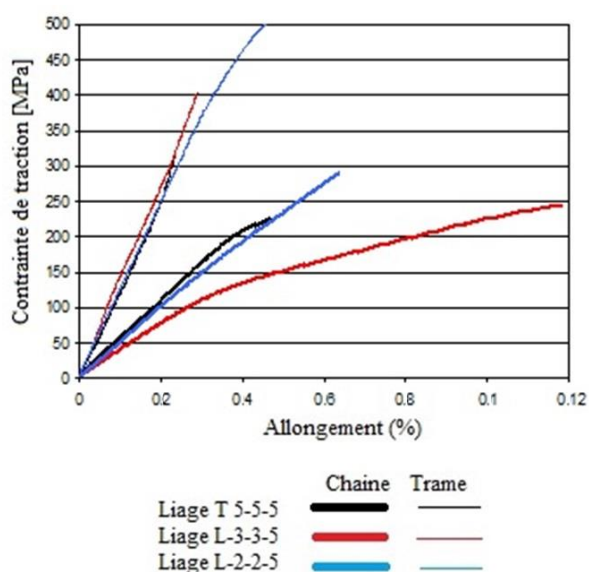


Figure 25. Courbes de traction-allongement dans les sens chaîne et trame pour les trois types de liage du tissu 3D interlock d'angle résiné.

Afin de comparer les types de liage des différents tissus résinés et non résinés, nous avons calculé à partir des données mesurées des Tableau 7 et Tableau 10, les valeurs de ténacité spécifique et module spécifique (Tableau 11) dans les sens chaîne et trame, respectivement par le biais des Équation 3 et Équation 4.

$$\text{Équation 3} \quad Ts = \frac{\text{Contrainte à rupture}}{\frac{\text{masse surfacique}}{\text{épaisseur}}}$$

avec :

Contrainte à rupture en MPa  
masse surfacique en g/m<sup>2</sup>  
épaisseur en mm

$$\text{Équation 4} \quad \sigma_s = \frac{\text{Module de Young}}{\frac{\text{masse surfacique}}{\text{épaisseur}}} \times 1000$$

avec :

Module de Young en GPa  
masse surfacique en g/m<sup>2</sup>  
épaisseur en mm

Tableau 11. Ténacités et modules spécifiques des tissus et tissus résinés 3D interlock d'angle pour les trois types de liage

	Ténacité spécifique ( $T_s$ )		Module spécifique ( $\sigma_s$ )	
	Chaîne (N/tex)	Trame (N/Tex)	Chaîne (N/tex)	Trame (N/Tex)
Interlock A - Liage T 5-5-5	0,48	1,01	12,53	46,67
Interlock A - Liage L 3-3-5	0,67	0,86	11,69	40,91
Interlock A - Liage L 2-2-5	0,75	1,12	36,95	41,92
Interlock A résiné - Liage T 5-5-5	0,19	0,32	44,29	88,42
Interlock A résiné - Liage L 3-3-5	0,20	0,37	30,03	111,78
Interlock A résiné - Liage L 2-2-5	0,24	0,43	43,13	85,13

### c) Comparaison des caractéristiques mécaniques des tissus 3D interlocks chaînes résinés et non résinés

De façon globale, nous pouvons observer une corrélation inverse entre les valeurs de ténacités et de modules spécifiques pour chacun des trois types de liage pour à la fois les tissus non résinés et résinés (Figure 26). En effet, lorsque nous observons une valeur forte de la ténacité spécifique pour les trois types de liage, aussi bien dans le sens chaîne et trame, nous trouvons à l'inverse une valeur faible du module spécifique et réciproquement. Ceci s'explique par le fait que la valeur plus forte du module spécifique reflète un comportement plus raide du tissu non résiné ou du tissu résiné, qui donc s'allonge moins et sera plus rapidement en rupture, conduisant à une valeur de ténacité spécifique plus faible. Inversement, une valeur plus faible du module spécifique apporte moins de raideur au tissu non résiné ou tissu résiné, ce qui augmente sa capacité d'allongement et le rend plus tenace pour aboutir à une valeur de ténacité spécifique plus importante.

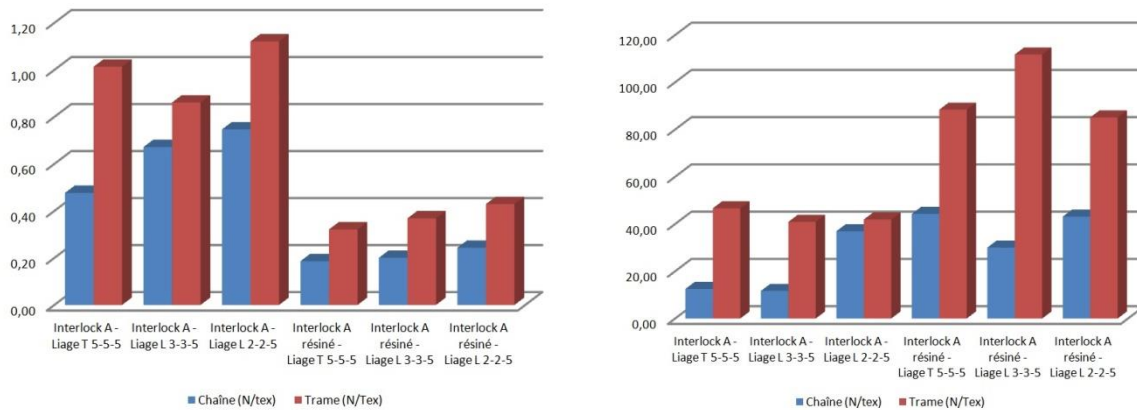


Figure 26. Comparaison des ténacités spécifiques (gauche) et modules spécifiques (droite) des tissus non résinés et tissus résinés interlock d'angle pour les trois types de liage.

De façon locale, hormis la valeur de ténacité spécifique du tissu interlock A en liage T 5-5-5 dans le sens trame reflétant un comportement des fils de trame de la structure similaire au liage L 2-2-5, l'ensemble des valeurs de ténacités spécifiques des tissus non résinés et des tissus résinés évoluent de façon croissante du liage T 5-5-5, au liage L 3-3-5 pour finir par le liage L 2-2-5. Cela traduit une corrélation positive entre la valeur de ténacité spécifique et le nombre croissant de points de liage présents dans le renfort tissé.

De façon globale, les différences de module spécifique constatées entre les valeurs du sens chaîne et les valeurs du sens trame pour les trois types de liage s'amplifient pour les tissus résinés. Cette tendance conforte la contribution de la résine dans l'augmentation de la rigidité de la structure tissée. Cela confirme également la différence de comportement sous sollicitation mécanique unidirectionnelle entre le sens chaîne des trois types de liage de la structure tissée, avec des fils de liage possédant une valeur d'embuvage plus important dont l'évolution reste figée au sein du tissu résiné, et le sens trame des trois types de liage, dont l'évolution plus rectiligne des fils se traduit par des valeurs de retrait plus faible.

Dans de futurs travaux de recherche, il serait intéressant de réaliser une étude étendue aux différents paramètres produits d'une structure tissée 3D interlock chaîne, tels que : le nombre de couches, les titrages des fils de chaîne et trame et les densités par couche; pour mesurer leur influence sur les propriétés mécaniques résiduelles.

### C. Influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication

Dans le cadre des travaux de recherche de Provost [16], nous avons pu observer, à l'échelle mésoscopique, les trajectoires des fils de chaîne et trame au sein d'un tissu 3D interlock chaîne par le biais d'images tomographiques à rayons X, ce qui nous a permis d'identifier différentes formes de sections de fils en fonction de leur position au sein de la structure tissée. Ces observations nous renseignent, à l'échelle du contact des fils entre eux, sur leurs contraintes internes résiduelles aboutissant aux déformations transversales des fils de chaîne et trame sur leur longueur.

Nous avons pu identifier l'ensemble des formes géométriques des sections des fils de chaîne et trame existant au sein d'un tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-5 base diagonale 5-4 décochement de 3 (Figure 27).

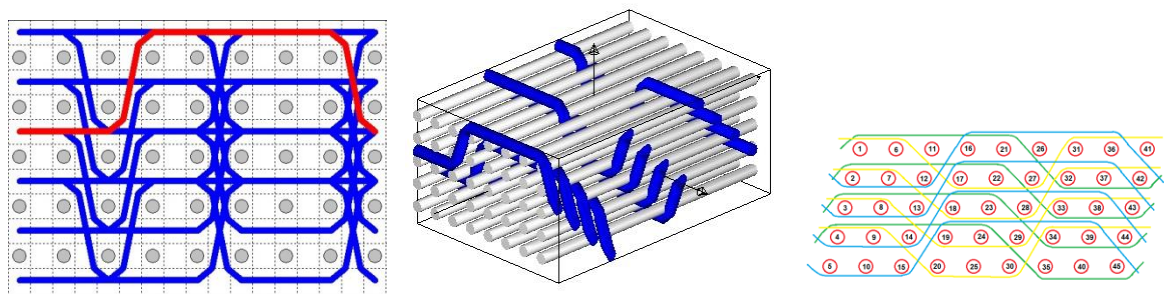


Figure 27. (gauche) Représentation géométrique en coupe des fils de trame - (milieu) Représentation de l'évolution des fils de chaîne - (droite) Numérotation des fils de trame de la structure élémentaire du tissu interlock A - Liage L 4-2-5 base diagonale 5-4 décrochement de 3.

Les différentes représentations dans les directions chaîne et trame du tissu 3D interlock chaîne ont permis de réaliser cette identification précise des différentes sections de fils de chaîne et trame. A partir d'un tissu interlock A - liage L 4-2-5 réalisé à partir de fils chaîne et trame multi-filaments continus para-aramides de 3360 dTex, une première observation de la répartition et la section géométrique réelle des fils de chaîne, par le biais d'une vue en coupe de la structure tissée (Figure 28), a permis de distinguer un placement régulier dans l'espace des fils de chaîne repartis dans les différentes broches du peigne de la machine à tisser.

#### 1. Observation de la section géométrique des fils de chaîne au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne

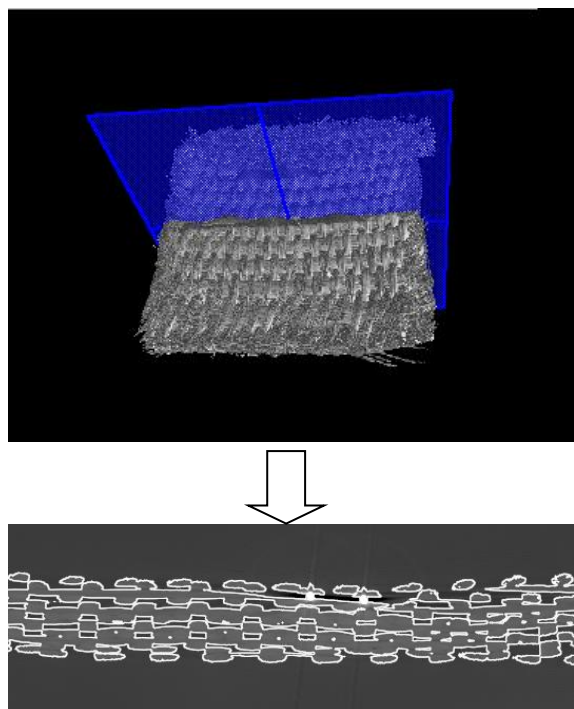


Figure 28. Vue en coupe des fils de chaîne issue de la représentation tomographique 3D de la structure interlock A - Liage L 4-2-5.

Nous avons pu observer (Figure 29) une forme de section elliptique pour les fils de chaîne se trouvant au niveau des surfaces extérieures alors que les fils présents dans l'épaisseur du renfort présentent une section rectangulaire, principalement due à leur maintien entre eux par contact et par les broches du peigne de la machine à tisser.



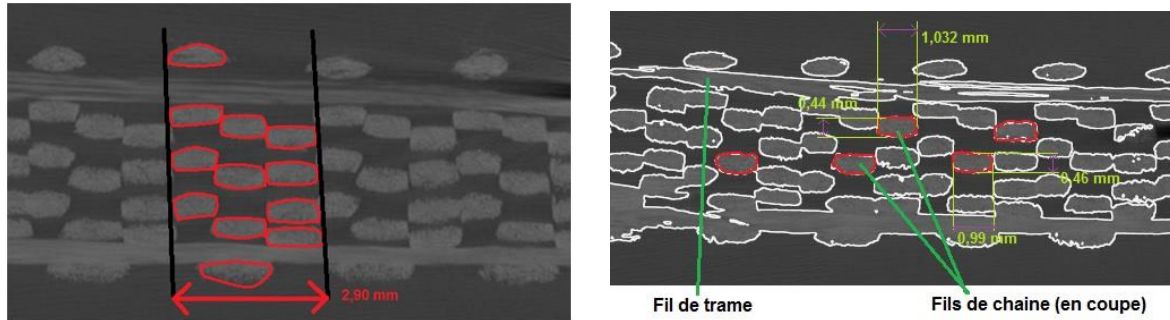


Figure 29. (gauche) représentation en coupe des fils de chaîne au sein d'un motif élémentaire du tissu - (droite) mesures des sections des fils de chaîne au sein de la structure tissée.

Par recouplement des différents plans successifs en coupe des sections de fils de chaîne situés à différentes positions au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne, nous avons pu identifier les différentes zones d'évolution de section pour chaque fil de chaîne de liage (Figure 30).

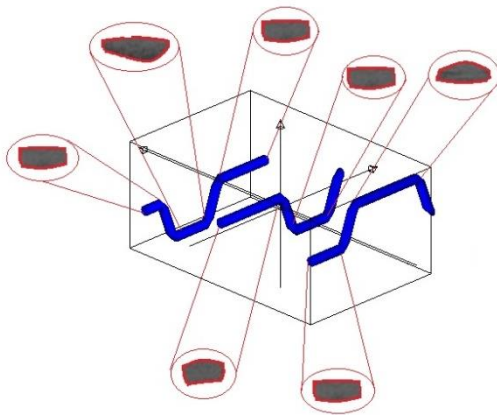


Figure 30. Représentation des évolutions de section des fils de chaîne de liage au sein du tissu interlock A - Liage L 4-2-5.

Cependant, sur la base de ces observations, les formes des sections des fils de chaîne de liage peuvent être regroupées par classes. Ainsi, dans le cadre des travaux de Provost [16], nous avons effectué ce regroupement par reconnaissance et mesure visuelles de l'ensemble des sections des fils de chaîne en deux types de classes possédant alternativement une section rectangulaire moyenne de  $1\text{ mm} \times 0,45\text{ mm}$ , lorsqu'ils sont situés au sein de la structure, et une section elliptique moyenne de  $1,2\text{ mm} \times 0,45\text{ mm}$  lorsqu'ils sont localisés en périphérie du tissu.

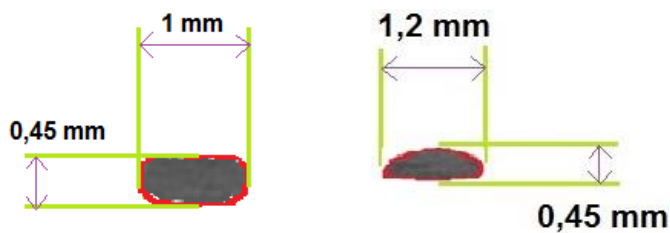


Figure 31. Classification des sections moyennes des fils de chaîne (gauche) au cœur de la structure (droite) et en périphérie de la structure.

## 2. Observation de la section géométrique des fils de trame au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne

L'observation, en coupe des fils de trame au sein de la structure tissée (Figure 28), a permis de révéler l'évolution en couche à couche des fils de chaîne mais également des différences importantes de géométrie en section des fils de trame en fonction de leur position.

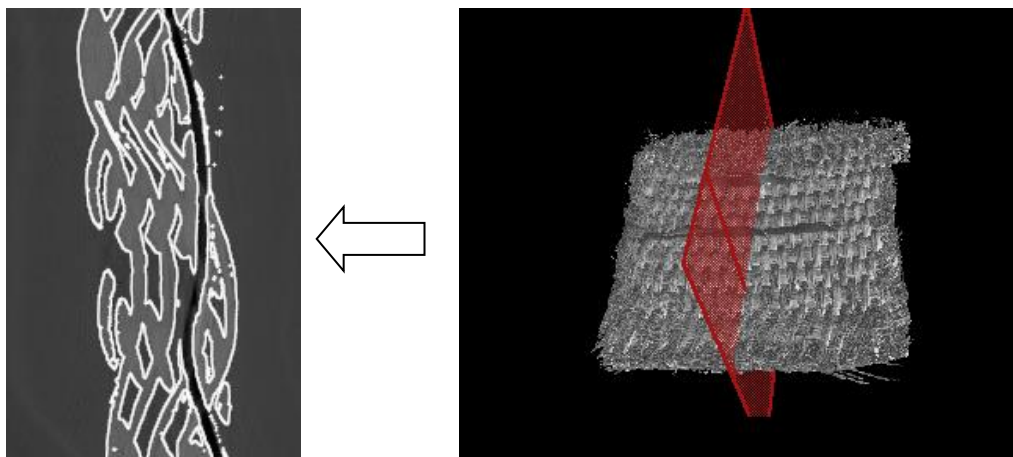


Figure 32. Vue en coupe des fils de trame et évolution des fils de chaîne issue de la représentation tomographique 3D de la structure interlock A - Liage L 4-2-5.

Dans la représentation en coupe des fils de trame (Figure 33) d'un motif élémentaire du tissu 3D interlock chaîne, nous pouvons observer que les colonnes de fils de trame ne sont pas alignées. En effet, les fils de trame sont généralement légèrement décalés en fonction de l'ordre dans lequel les fils sont insérés dans le renfort au cours du procédé de tissage.

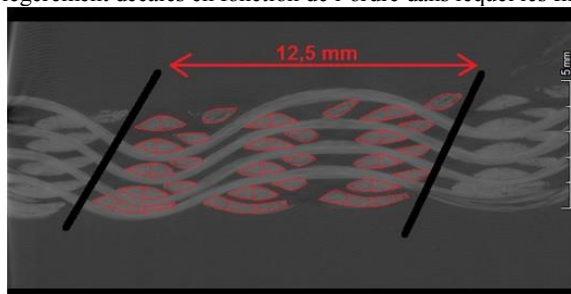


Figure 33. Représentation en coupe des sections des fils de trame et de l'évolution des fils de chaîne au sein d'un motif élémentaire du tissu.

Afin d'expliquer les différents types de géométries de section des fils de trame, la superposition des 3 plans de fils de chaîne de liage du motif élémentaire (Figure 34 - gauche) a permis de bien comprendre la localisation des tensions exercées par les contacts entre les fils de chaîne de liage et les fils de trame.

En utilisant la représentation géométrique simplifiée d'évolution des fils de trame dans la structure (Figure 27 -droite), nous avons pu reconnaître et numéroté l'intégralité des fils de trame (Figure 34 -droite).

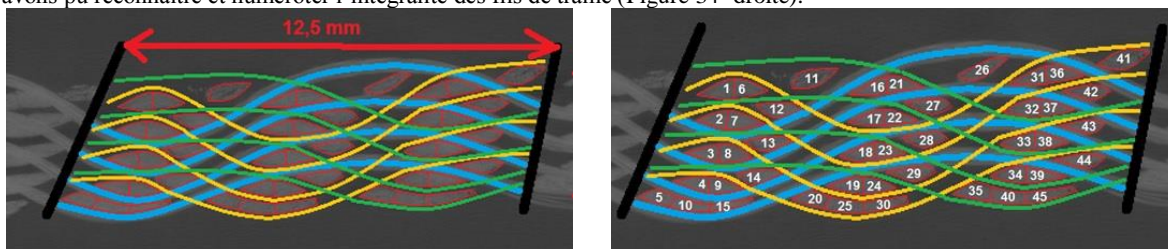


Figure 34. (gauche) superposition des 3 types d'évolution des fils de chaîne sur la vue en coupe des fils de trame - (droite) numérotation des sections des fils de trame d'un motif élémentaire de la structure tissée 3D interlock chaîne.

Les fils de trame peuvent prendre des formes de section relativement variées en fonction des contacts que ces derniers ont avec les fils de chaîne ou avec les autres fils de trame. Des regroupements de fils aboutissent à des sections relativement elliptiques (Figure 35), ainsi que des sections en forme de losange (Figure 35) sont révélées par leur localisation au croisement de deux évolutions différentes de fils de chaîne. Ces différences de sections et de placement sont dues au procédé de tissage lui-même ainsi qu'aux contraintes qui s'appliquent sur les fils de trame lors des différents mouvements des fils de chaîne de liage au sein de la structure. Les fils de trame sont insérés avec une légère tension lors du tissage, puis ne subissent aucune tension lorsqu'ils sont complètement relâchés lors de la fermeture de la foule. Ils ont donc plus de possibilité de se déformer, puisque selon leur placement dans la structure, ils seront en contact avec plus ou moins de fils de chaîne ayant des évolutions différentes, ce qui leur confère leur forme atypique.

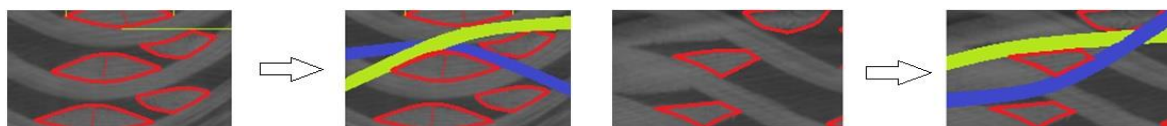


Figure 35. Superposition de l'évolution des fils de chaîne de liage (en couleur jaune et bleu) aboutissant soit au regroupement de fils de trame en section elliptique (gauche) - soit à la déformation de la section d'un fil de trame sous la forme d'un losange (droite).

Par recouplement des différents plans successifs en coupe des sections de fils de trame localisés aux différents endroits de la structure tissée 3D interlock chaîne, nous avons pu identifier les différentes zones d'évolution de forme de section pour chaque fil de trame (Figure 36).

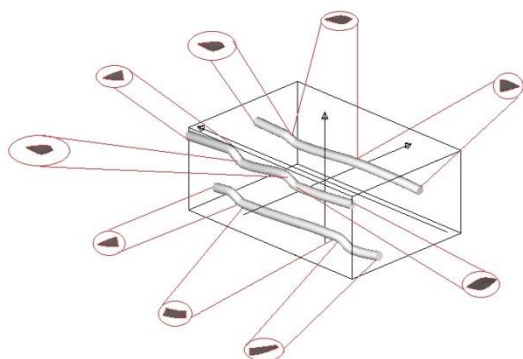


Figure 36. Représentation des évolutions de forme de section des fils de trame au sein du tissu interlock A - Liage L 4-2-5.

De même que précédemment pour la classification des sections des fils de chaîne de liage, dans le cadre des travaux de recherche de Provost [16], nous avons pu regrouper, par reconnaissance et mesure visuelles, l'ensemble des sections des fils de trame en différentes classes principales. Différentes mesures effectuées sur les images tomographiques des tissus en coupe ont permis de distinguer trois classes de forme de section de fils de trame (Figure 37). Par exemple, les couples de fils 31-36, 32-37, 33-38, 34-39 sont collés entre eux pour former une section elliptique globale alors que les fils 41, 42, 43; 44 forment à eux seuls une section elliptique plus petite. La section des fils 35, 40, 45 peut être assimilée à une forme compacte spécifique.

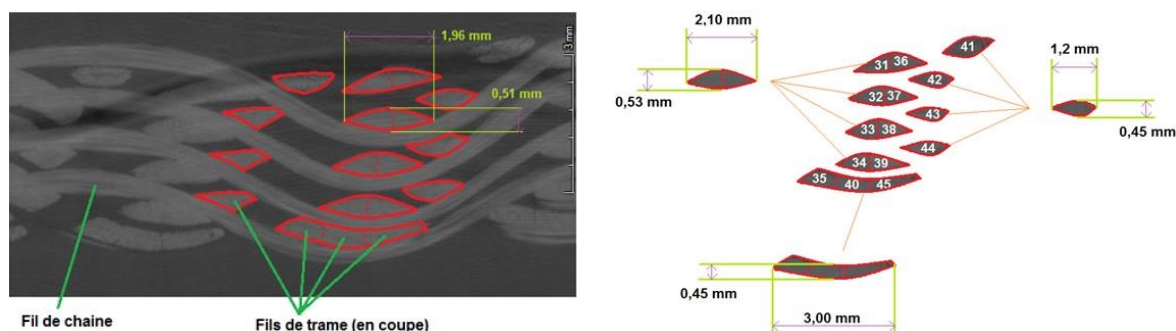


Figure 37. (gauche) mesures des sections des fils de trame au sein d'un motif élémentaire du tissu - (droite) distinction des trois classes principales des formes de section des fils de trame.

Ainsi, à chaque fil de trame est attribué une forme type de section correspondant à l'une des trois classes identifiées pour une position donnée au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne (Figure 38).

Type de section:			
Fils concernés:	11 - 12 - 13 - 14 - 26 - 27 - 28 - 29 - 41 - 42 - 43 - 44	[1-6] - [2-7] - [3-8] - [4-9] - [16-21] - [17-22] - [18-23] - [19-24] - [31-36] - [32-37] - [33-38] - [34-39]	[5-10-15] - [20-25-30] - [35-40-45]

Figure 38. Classification des sections moyennes des fils de trame (gauche) en contact dans la structure tissée avec les fils de chaîne de liage ou (milieu) en regroupement au sein de la structure tissée ou (droite) en périphérie de la structure tissée.

Dans le cadre des travaux de recherche de Lapeyronnie [37], notre contribution à l'analyse fine et précise des géométries réelles des tissus 3D interlocks chaines a permis de développer un outil numérique, permettant de déterminer les propriétés élastiques équivalentes d'un composite 3D interlock. La méthode d'homogénéisation [53] périodique utilisée donne des résultats précis [54], pour une géométrie réaliste (dimensions et propriétés matériaux mesurées) mais qui néglige encore l'écrasement local et l'imbrication des fils (pouvant être introduits ultérieurement mais nécessitant une étude statistique représentative des différents cas possibles). Le programme développé permet la génération automatique d'une cellule unité, permettant de faire varier les paramètres géométriques [55].

La comparaison expérimentale démontre une corrélation raisonnable mais pouvant être affinée [56]. Elle met en avant les manques du modèle numérique développé (imbrication, compaction, sections), qu'il est important de considérer par la suite grâce à des observations et des études statistiques.

## D. Conclusion sur l'influence des paramètres de produit et de procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines

Nous avons pu observer, dans divers travaux de recherche, les différentes représentations réelles des tissus 2D et 3D par le biais de deux procédures expérimentales; l'une consistant à observer à l'aide d'un microscope, à une échelle de  $10^{-4}$  m, des fines lamelles découpées dans les deux directions chaîne et trame de tissus résinés à froid et sans déformation; l'autre consistant à observer les structures tissées sans apport de résine par le biais d'images obtenues, à une échelle de  $10^{-6}$  m, par tomographie à rayons X et reconstituées informatiquement pour obtenir une visualisation 3D des tissus permettant d'explorer la structure tissée dans toutes les directions. En utilisant cette dernière technique, nous avons pu observer l'évolution de la section des fils de chaîne et trame en fonction de leur position au sein du tissu 3D interlock chaîne. Ces résultats nous ont apporté une classification des différentes formes principales de sections des fils de chaîne et trame nous permettant d'optimiser les zones de représentation des géométries des fils de la structure tissée multi-couches.

L'observation des tissus, par le biais de vues en coupe des fils de chaîne et trame, a permis de révéler la complexité interne de la géométrie des structures tissées, dépendante des nombreux paramètres de produit du tissu mais également liés aux paramètres de procédé de fabrication. En effet, nous avons pu montrer l'influence du montage des fils de chaîne sur la machine à tisser, notamment à travers le peigne, et de leur sélection au cours du tissage sur la géométrie finale tissée. Et également l'influence du paramètre produit relatif à la densité des fils de chaîne sur la géométrie finale des tissus 3D interlocks chaines et le paramètre produit relatif à la géométrie des tissus 3D interlock chaines sur l'évolution, le positionnement et la forme des fils. Par ces résultats de recherche, nous pouvons mesurer l'incidence des paramètres produit et procédé de fabrication sur les modifications de géométrie des tissus 3D interlocks chaines, ce qui nous révèle la relation de dépendance importante entre les valeurs de montage ou réglage du procédé de tissage sur les propriétés physiques et architectures des tissus 3D interlocks chaines.

## V. Synthèse

Dans le cadre des différents travaux de recherche menés sur les tissus 3D interlocks chaines, nous avons révélé la diversité des informations nécessaires pour les décrire ainsi que la complexité de leur géométrie finale. Ainsi, nous avons fourni une définition complète et précise, fondée sur les définitions existantes mais incomplètes, des structures tissées 3D interlocks chaines. Par le biais des images des tissus 3D interlocks chaines, nous avons constaté l'influence des paramètres de procédé de fabrication et des paramètres de produit de la structure tissée sur la géométrie finale du tissu. Par la suite, nous avons identifié les principales propriétés mécaniques des différents types de liage des tissus 3D interlocks chaines par une caractérisation en traction quasi-statique en tant que renfort fibreux de matériaux composite. Afin de synthétiser l'information globale de la géométrie des fils au sein de la structure tissée, nous avons regroupé par classification de zones les formes observées et similaires des sections des fils de chaîne et trame.

Le développement de ce thème relatif à la classification et au paramétrage des tissus 3D interlocks chaines a été valorisé scientifiquement par :

- 2 publications [46][55],
- 11 communications [35][36][42][43][44][45][48][52][53][54][56],
- 7 thèses de doctorat soutenues [16][18][2][26][37][38][39],
- 2 masters recherches soutenus [29][41],
- 1 rapport interne de recherche [32].

## VI. Bibliographie

- [1] F. Boussu, X. Legrand, S. Nauman, and P. Bruniaux, "Comparison of the geometrical and mechanical models used for the textile composite structures," in *International conference CORTEP*, vol. 1, Iasi, Romania, 18 au 21 octobre 2007, pp. 21 – 30.
- [2] S. Nauman, "Geometrical modelling and characterization of 3D warp interlock composites and their on-line structural health monitoring using flexible textile sensors," University of Lille 1, Lille, Ph-D thesis 24/03/2011.
- [3] M. Sherburn, "Geometric and mechanical modelling of textiles," University of Nottingham, Nottingham, UK, UK, Ph-D thesis <http://etheses.nottingham.ac.uk/303/1/thesis-final.pdf>, 2007.

- [4] S. Lomov, A.V. Gusakov, G. Huysmans, A. Prodromou, and I. Verpoest, "Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 2083-2095, 2000.
- [5] Pointcarre. (2008) Pointcarre softwares (Version 3.0.60). [Online]. [http://www.pointcarre.com/portfolio\\_item/dobby-software/](http://www.pointcarre.com/portfolio_item/dobby-software/)
- [6] EAT GmbH. (2011) The DesignScope Company. [Online]. <http://www.designscopecompany.com/weave/>
- [7] J. Dantzer and D. de Prat, *Les tissus - I - tissus classiques*, Librairie Polytechnique Ch. Béranger ed. Paris, 1949.
- [8] J. Dantzer and D. de Prat, *Les tissus - II - tissus spéciaux*, Librairie Polytechnique Ch. Béranger ed. Paris, 1949.
- [9] AFNOR, "dictionnaire des termes normalisés NF G 00-001," Agence Française de Normalisation, tome 1 1988.
- [10] S. Adanur, *Handbook of weaving*.: CRC Press, 2001.
- [11] P.R. Lord and M.H. Mohamed, *weaving, conversion of yarn to fabric*, woodhead publishing, Ed., 1999.
- [12] K. Ghandi, *Woven textiles: Principles, Technologies and applications*, woodhead publishing, Ed., 2012.
- [13] V.V. Choogin, P. Bandara, and E.V. Chepelyuk, *Chapter 1, Basic mechanisms of the weaving machine*, woodhead publishing, Ed., 2013.
- [14] A. Delommez and E. Popelier, *Atlas d'armures Textiles*. Roubaix: Duporge, 1951.
- [15] L Tong, AP Mouritz, and MK Bannister, *3D Fibre Reinforced Composite Materials*. London: Elsevier Applied Science, 2002.
- [16] B. Provost, "Étude et Réalisation d'une solution à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 14/01/2013.
- [17] C. El Hage, "Modélisation et comportement élastique endommageable de matériaux composites à renforts tridimensionnels," Université Technologique de Compiègne, Compiègne, thèse de doctorat Octobre 2006.
- [18] M. Lefebvre, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 07/12/2011.
- [19] B.K. Behera and R. Mishra, "3-Dimensional Weaving," *Indian Journal of Fiber and Textile Research*, vol. 33, pp. 274-287, 2008.
- [20] N. Khokar, "3D-Weaving and Noobing: Characterization of Interlaced and Non-interlaced 3D Fabric Forming Principles," *Polymeric Materials*, 1997.
- [21] X. Chen, "3D Weaving and 3D Woven Structures," University of Manchester - School of Materials, Manchester, Courses.
- [22] T.W. Chou, "Three-dimensional textile Structural Composites," in *Microstructural Design of Fiber Composites*. New York, NJ, USA: Cambridge University Press, 1992.
- [23] A.E. Bogdanovich and M.H. Mohamed, "Three dimensional reinforcements for composites," *SAMPE journal*, vol. 45, pp. 8-28, 2009.
- [24] J. Hu, *3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structure*.: Woodhead publishing, 2008, vol. 74.
- [25] M. Ansar, W. Xinwei, and Z. Chouwei, "Modeling strategies of 3D woven composites: A review," *Composite structures*, vol. 93, no. 8, pp. 1947 - 1963, 2011.
- [26] C. Ha-Minh, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 17/11/2011.
- [27] S.Z. Sheng and S.V. Hoa, "Modelling of 3D Angle Interlock Woven Fabric Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 16, no. 1, pp. 45-59, 2003.
- [28] H. Gu and Z. Zhili, "Tensile Behaviour of 3D Woven Composites by using Different fabric Structures," *Materials and Design*, vol. 23, pp. 671-674, 2002.
- [29] S. Nauman, "Modélisation Géométrique de tissu 3D Interlock," Laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, Master report 2008.
- [30] X. Ding and H.L. Yi, "Parametric Representation of 3D Woven Structure," in *6th Asian Textile Conference (CD Version)*, Hong Kong, China, 2001.
- [31] H.L. Yi and X. Ding, "Conventional Approach on Manufacturing 3D Woven Preforms Used for Composites," *Journal of Industrial Textiles*, pp. 34-39, 2004.
- [32] I. Christian, "Optimisation des caractéristiques mécaniques des structures tissées multi-couches interlock," Agence Universitaire de la Francophonie, Roubaix, France, Rapport de Bourse post-doctoral du 06/10/2008 au 06/04/2009.
- [33] S. Adanur and T. Liao, "3-D modeling of textile composite preforms," *Composites Part B*, vol. 29, pp. 787-793, 1998.
- [34] P. Tan, L. Tong, and G.P. Steven, "Micromechanics models for mechanical and thermomechanical properties of 3D through-the-thickness angle interlock woven composites," *Composites Part A*, vol. 30, pp. 637-648, 1999.
- [35] F Boussu, X Legrand, and A Serret, "A general clustering of warp interlock structures," *1st Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2007)*, pp. 83 -90, 2007.
- [36] F. Boussu, X. Legrand, and C. Binetruy, "General definition of warp interlock structures," in *TexComp 9, the 9th Annual International Conference on Textile Composites*, University of Delaware, Newark, Delaware, October 13 – 15, 2008, pp. 399-408.
- [37] P. Lapeyronnie, "Mise en œuvre et comportement mécanique de composites organiques renforcés de structures 3D interlocks," Université de Lille 1, Douai, France, Thèse de doctorat 14/12/2010.
- [38] J. Vilfayeu, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," Thèse de doctorat 13/03/2014.
- [39] C. Florimond, "Contributions à la modélisation mécanique du comportement de mèches de renforts tissés à l'aide d'un schéma éléments finis implicite," Université de Lyon, Lyon, France, Thèse de doctorat 29/11/2013.
- [40] S.W. Yurgartis and J. Jortner, "Characterisation of yarn shape in woven fabric composites," in *Microstructural characterization of fibre-reinforced composites*.: Woodhead Publishing Limited, 1998.
- [41] C. Chevalier, "Étude de l'influence de paramètres intrinsèques à un tissu interlock sur ses propriétés balistiques," ISL, Saint-Louis, France, Projet de fin d'études 2012.
- [42] F. Boussu, X. Legrand, S. Nauman, and V. Koncar, "Geometric modelling of 3D angle interlock fabrics," in *Autex 08, World Textile Conference*, Biella, Italie, June 24-26, 2008.



- [43] S. Nauman, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Geometrical modelling of 3D textile composite application to warp interlock carbon fabrics," in *13th European Conference on Composite Materials*, Stockholm, Sweden, June 2 - 5, 2008.
- [44] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Weaving of 3D interlock layer to layer carbon-glass reinforcement on a conventional loom," in *2nd international Conference on textile and Clothing*, Lahore, Pakistan, 4-5 March 2009.
- [45] S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, X. Legrand, and V. Koncar, "Application of 3D geometrical modelling approach on multilayer angle interlock carbon reinforcements," in *10th World Textile Conference*, Vilnius, Lithuania, 21-23 June, 2010.
- [46] S. Nauman, I. Cristian, and F. Boussu, "Geometrical Modelling of Angle Warp Interlock Fabrics," *Journal of Textile Institute*, vol. 103, no. 7, pp. 766-776, 2012.
- [47] AFNOR, "Verre textile -tissus-détermination de la force de rupture en traction et de l'allongement à la rupture par la méthode de la bande," AFNOR, Norme NF ISO 4606, 1996.
- [48] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Geometrical characterization of orthogonal / layer-layer woven interlock carbon reinforcement," in *AUTEX 2009 World Textile Conference*, İzmir, Turkey, May, 26-29, 2009, pp. 682-691.
- [49] AXSON France. (2008, Apr.) Epolam 5015 Resin Technical Data Sheet - Epolam 5014 – 5015 – 5016 Hardeners - Laminating system for resin infusion, . [Online]. <http://www.axson-na.com/TDSs/TDS-Epolam 5015 System - US REV 02.pdf>
- [50] "ASTM D3171-09 Standard test methods for constituent content of composite materials," ASTM, West Conshohocken, PA. USA, Norm 2010.
- [51] "NF EN ISO 527-4 Plastiques - Détermination des propriétés en traction, partie 4, condition d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes," CEN, Norme 1997.
- [52] S. Nauman, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Geometrical characterization of 3D angle interlock fabrics," in *17th International Conference on Composite Materials*, Edinburgh, UK, 27-31 July 2009.
- [53] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, P. Krawczak, and F. Boussu, "Homogenization of the mechanical behavior of a layer-to-layer angle-interlock composite," in *SAMPE Europe 30th International Jubilee Conference and Forum*, Paris, France, 23-25 March 2009, pp. 224-230.
- [54] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, P. Krawczak, and F. Boussu, "Homogenization of the mechanical behavior of a layer-to-layer angle-interlock composite," in *17th International Conference on Composite Materials*, Edinburgh, UK, 27-31 July 2009.
- [55] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, and F. Boussu, "Homogenization of the elastic behaviour of a layer-to-layer angle-interlock composite," *Composite Structures*, vol. 93, no. 11, pp. 2795-2807, 2011.
- [56] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, and F. Boussu, "Homogenization of the mechanical behavior of a layer-to-layer angle-interlock composite," in *10th International Conference on Textile Composites*, Lille, France, October 26–28, 2010, pp. 20-27.

## Thème 2. Propriétés et mise en forme des tissus 3D interlocks chaines

Le deuxième thème se focalise sur les propriétés résiduelles des tissus 3D interlocks chaines en tant que renfort fibreux multidirectionnel pour des structures composites complexes. Par le biais d'une étude bibliographique complétée de nos résultats de recherche, nous avons mis en évidence les avantages et inconvénients du procédé de fabrication, de l'architecture tissée et des propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines. La résistance au délaminage ainsi que la résistance à l'impact semblent être les deux caractéristiques mécaniques principales des tissus 3D interlocks chaines. Sur la base de ces propriétés, nous avons montré la capacité de déformation par procédé de pliage et de mise en forme, à vitesse quasi-statique, des tissus 3D interlocks chaines.

### Sommaire

I.	Introduction .....	43
II.	Avantages et inconvénients des tissus 3D interlocks chaines en termes de paramètres produit et procédé de fabrication .....	43
A.	Avantages des tissus 3D interlocks chaines.....	43
B.	Inconvénients des tissus 3D interlocks chaines.....	43
III.	Propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines.....	44
A.	Avantages en termes de propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines .....	44
1.	Résistance au délaminage.....	44
2.	Résistance à l'impact.....	45
B.	Inconvénients en termes de propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines .....	46
C.	Mesure in-situ lors de la caractérisation d'un tissu 3D interlock chaîne résiné.....	47
D.	Conclusion sur les propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines .....	48
IV.	Pliage et mise en forme des tissus 3D interlocks chaines .....	48
A.	Pliage dans l'épaisseur d'un tissu 3D interlock chaîne.....	49
B.	Mise en forme d'un tissu 3D interlock chaîne dans la direction de l'épaisseur .....	52
C.	Mise en forme symétrique du tissu 3D interlock chaîne.....	52
1.	Mesure de la variation d'épaisseur.....	53
2.	Mesure de l'avalancement dans les deux directions du tissu .....	54
3.	Mesure du glissement entre les couches externes du tissu 3D interlock chaîne.....	54
4.	Mesure des valeurs d'angle de cisaillement entre les fils de chaîne et trame.....	55
5.	Comparaison des valeurs de mesures effectuées sur les tissus 3D interlocks chaines déformés .....	55
D.	Mise en forme asymétrique du tissu 3D interlock chaîne .....	56
E.	Conclusion sur la mise en forme des tissus 3D interlocks chaines .....	58
V.	Synthèse .....	58
VI.	Bibliographie .....	58

## I. Introduction

L'objectif général de ce thème consiste à identifier les avantages et inconvénients des tissus 3D interlocks chaines via à vis de leurs paramètres de produit et de procédé de fabrication issus de la littérature scientifique, complétés par nos travaux de recherche. A partir de cette connaissance, nous pouvons orienter la conception des produits, adapter nos procédés de fabrication et régler les paramètres de fabrication pour obtenir les propriétés mécaniques nécessaires aux contraintes et déformations lors d'une étape de pliage ou de mise en forme dans l'épaisseur de la structure tissée. Lors du précédent thème, nous avons pu identifier les paramètres produits qui définissent les tissus 3D interlocks chaines et influent sur leurs propriétés géométriques (thème 1). Ce thème est orienté plus spécifiquement sur les propriétés mécaniques de ces structures, et exploiter leur capacité de déformation lors des procédés de pliage ou de mise en forme des renforts fibreux pour des matériaux composites.

## II. Avantages et inconvénients des tissus 3D interlocks chaines en termes de paramètres produit et procédé de fabrication

Nous avons pu souligner que les tissus 3D interlocks chaines présentent des avantages techniques et économiques par rapport à d'autres renforts et viennent remplacer les stratifiés dans des applications où ces derniers ne sont plus adaptés [1]. Cependant, ce type de tissu présente aussi quelques inconvénients inhérents à sa fabrication et à son architecture spécifique [2].

Sur la base des résultats connus dans la littérature, complétés par nos travaux de recherche [3][4][5][6][7][8], nous avons pu identifier les avantages et inconvénients, à la fois, du procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines mais aussi de leur architecture, correspondant à un grand nombre de possibilité d'assemblage de fils de chaîne et de trame dans le plan mais aussi dans l'épaisseur de la structure [9]. Les observations expérimentales détaillées sur les composites tissés 3D ont indiqué que la géométrie du tissu a un rôle dominant et déterminant sur leurs propriétés mécaniques et les mécanismes de rupture associés [10]. L'une des plus intéressantes caractéristiques des tissus interlocks reste la modularité de leurs architectures et le contrôle de l'évolution des fils de renforts dans la structure conduisant à une maîtrise des propriétés mécaniques [11].

### A. Avantages des tissus 3D interlocks chaines

Comme l'ont souligné Tong et al. [12], nous confirmons également que les fibres à hautes performances sont intégrables, sans dégradation majeure, dans ces structures tissées multi-couches et plus aisément en tant que fil de trame et/ou fil de chaîne de renfort pour augmenter la résistance dans les deux directions du tissu 3D interlock chaîne. Ces mêmes auteurs soulignent aussi la facilité de mise en œuvre d'un matériau composite avec un renfort fibreux 3D [12], principalement en raison de leur architecture monolithique, compacte et intégrée [13][14]. Dans les tissus 3D interlocks chaines, les couches sont reliées entre elles par des fils de liage et assurent donc une cohésion plus forte, ce qui permet de produire directement un renfort épais [10], et non plus un ensemble de renforts fins qu'il faut par la suite assembler entre eux [15], et cela, tout en conservant la capacité à faire transiter la résine plus rapidement que dans des tissus 2D d'épaisseur équivalente [16]. De plus, plusieurs auteurs ont également mis en avant la possibilité de fabriquer des préformes complexes proches des formes de la pièce finale (near-net shape) [11] à partir des tissus 3D interlocks chaines, minimisant les besoins de coupe et d'assemblage de plis de tissus 2D [12], permettant de diminuer le coût des matériaux et les temps de main-d'œuvre [17], mais également d'éviter d'utiliser le procédé d'imprégnation de résine sous vide [18][19] en ayant recours à des fils thermoplastiques [20]. En outre, la possibilité de réaliser les tissus 3D interlocks chaines à l'aide de machines à tisser "traditionnelles" plus ou moins adaptées, rend leur production peu onéreuse par rapport aux autres technologies de fabrication des structures 3D complexes [9].

Selon plusieurs études sur l'architecture des tissus 3D interlocks chaines [21][22][23], la présence et le contrôle [14] d'un fil de chaîne de liage, pour ajuster les propriétés dans l'épaisseur (de 1 à 30% en volume) [16], permet d'assurer de meilleures propriétés mécaniques des structures 3D tissées par rapport aux tissus 2D empilés et cousus, à la fois dans le plan de la structure mais aussi par l'augmentation des propriétés de rigidité et de ténacité dans l'épaisseur [24].

L'homogénéité de l'architecture assure un comportement constant et continu. Une hétérogénéité de comportement peut également être provoquée par une hybridation d'architecture, conduisant à des variations de propriétés discontinues au sein de la structure tissée [18]. Ainsi, les fils de liage dissipent les chargements dans plusieurs directions et maintiennent les fils endommagés, conservant ainsi l'intégrité de la structure entière [25]. Les fils de chaîne de surface du tissu 3D interlock chaîne constituent une peau protectrice et jouent un rôle important dans l'évolution des dommages [26], ce qui, par contre, les rend sensiblement plus faibles aux entailles par rapport aux alliages de métaux et aux stratifiés [27].

De même, les tissus 3D interlocks chaines peuvent être caractérisés par leur plus grande facilité et efficacité à s'appliquer au sein d'un moule, en raison de leur forme 3D initiale et de leur cohésion en épaisseur lors du drapage; ce qui aboutira à une meilleure qualité de surface de la préforme tissée [18]. Ce que nous avons pu mesurer dans le cadre de nos travaux de recherche [28][29] lors d'essais de pliage et de mise en forme sous charge. Enfin, il est recommandé [30] de choisir une armure symétrique dans l'épaisseur pour stabiliser les consommations internes des fils entre eux, ce que nous avons pu également vérifier lors de la conception de structures tissées 3D interlocks chaines en terme de distribution des contraintes dynamiques issues d'un impact balistique conduisant à une meilleure répartition de l'énergie cinétique absorbée [7].

### B. Inconvénients des tissus 3D interlocks chaines

Nous avons constaté, lors de nos travaux de recherche [4][7], un endommagement des fils durant le tissage [31] à cause de leur abrasion [27], mais également par le contact avec d'autres éléments de la machine à tisser [32][33]. Nous avons pu, à la



fois le quantifier par le biais d'un coefficient de perte de charge [34] tout au long du processus de fabrication [35], mais également identifier les principales causes de cette dégradation [36]. Cela nous a permis d'adapter notre outil de production existant, mais également d'orienter principalement la conception de nos nouveaux outils de production pour minimiser l'effet du processus de fabrication sur la dégradation des fils au cours du tissage.

Force est de constater que les structures tissées 3D interlocks chaines ne sont pas produites en quantités suffisantes, ce qui ne permet pas d'en réduire le coût de fabrication; et plus précisément d'amortir le temps de préparation et de montage sur machine à tisser. C'est pourquoi, au-delà des nombreux avantages que peuvent présenter les tissus 3D interlocks chaines, les tissus 2D continuent d'être principalement utilisés par leur coût de revient plus faible pour de grande quantité à produire; et notamment dans la protection balistique [7].

Les tissus 3D interlocks chaines possèdent une valeur plus faible de fraction volumique de fibres que pour les tissus 2D ou les UD, cette fraction n'excède pas 55% [37], n'atteignant que rarement 60% [38]. En effet, les zones de vide, provoquées par la présence des fils de liage dans l'épaisseur, seront comblées par l'insertion de la résine lors de la fabrication du composite. Cela peut représenter un inconvénient dans la mesure où pour certaines applications, notamment en protection balistique, un taux de renfort fibreux élevé semble assurer une bonne protection à l'impact [7].

### III. Propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines

Une analyse bibliographique ciblée et complétée par nos travaux de recherche [3][4][5][6][7][8], nous ont permis de recouper et confirmer les résultats obtenus sur les propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines. Ces structures, du fait de leur mode de consolidation spécifique dans l'épaisseur, présentent des propriétés mécaniques intéressantes [39]. De façon récurrente, les tissus 3D interlocks chaines augmentent la résistance au délaminage [40] et la résistance à l'impact [41] [42]. De façon épisodique, certains travaux de recherche ont révélé des propriétés améliorées de résistance à la propagation de fissure, de tolérance aux dommages et de stabilité dimensionnelle [42].

#### A. Avantages en termes de propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines

Le liage dans l'épaisseur des tissus 3D interlocks chaines apporte une consolidation supplémentaire [43] aux différentes échelles de la structure tissée; au niveau local par l'entrecroisement des fils de chaîne de liage aux fils de chaîne de renfort et fils de trame des couches de tissus liés entre eux; ainsi qu'au niveau global, par le maintien de la cohésion entre les couches de la structure tissée 3D.

##### 1. Résistance au délaminage

Dans beaucoup d'études [12][11][10][14], la résistance au délaminage des structures tissées 3D est assurée par le renforcement dans l'épaisseur, notamment par les fils de chaîne de liage pour les tissus 3D interlocks chaines.

Pour les tissus 3D interlocks chaines, la résistance au délaminage peut être décomposée à une échelle macroscopique pour la structure tissée et à une échelle mésoscopique pour les fils. A l'échelle macroscopique, le mode de rupture peut se décomposer en traction dans le sens de l'épaisseur (solicitation principale des fils de liage à l'arrachement entre les couches) et en cisaillement de type II entre couches des tissus (propagation de la sollicitation principale par les fils de liage aux différentes couches de tissu). A l'échelle mésoscopique, le mode de rupture local peut être assimilé à du cisaillement plan au point d'entrecroisement des fils de chaîne de liage et des autres fils de chaîne de renfort et trame de chaque tissu (solicitation locale des fils de chaîne et trame de chaque tissu de façon indépendante).

Dans les travaux de Tong et al [12]; le délaminage des tissus 3D est caractérisé par le mode de rupture I (arrachement des fils de liage) et II (rupture en cisaillement) en comparaison avec des tissus 2D empilés et non liés dans l'épaisseur (Figure 39).

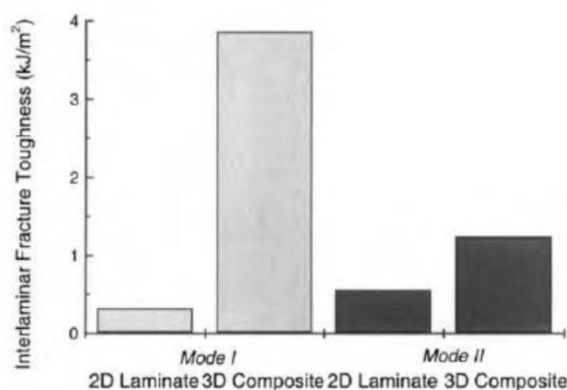


Figure 39. Résistance inter-laminaire en mode de rupture de type I et II des composites à base de tissus 2D empilés et de tissu 3D interlock chaîne [12].

Différentes études ont donc montré que la résistance en mode I des tissus 3D interlocks chaines est supérieure à celle des tissus 2D [12]. La résistance au délaminage est influencée par le taux de fibres dans la structure, le module élastique des fibres et leur résistance à la rupture. Ainsi, lorsque le délaminage commence à se propager entre les plis du composite, différentes zones peuvent être observées; la première correspond à la rupture des fils de liage et la séparation des couches

tissées, la deuxième représente uniquement la séparation des couches tissées sans rupture des fils de liage et enfin, la troisième initiant la propagation de la fissure entre couches à une vitesse dépendante des paramètres de résistance des fils de liage du tissu 3D interlock chaîne (Figure 40) [12].

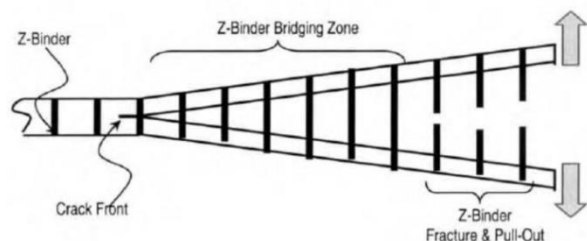


Figure 40. Endommagement des fils dans la direction de l'épaisseur pendant la phase de délaminage de la structure tissée multi-couches [12].

Cependant, en fonction de la géométrie de la structure tissée, des comportements en cisaillement inter-laminaire montrent l'efficacité des tissus 3D interlocks chaînes en liage d'angle par rapport aux autres liages et la diminution du délaminage en mode de rupture de type II (Figure 41) [22].

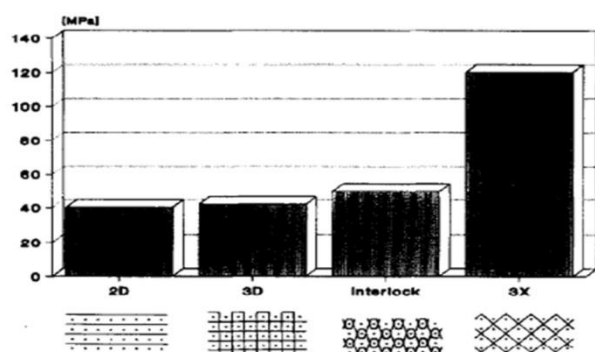


Figure 41. Influence de la géométrie du renfort textile sur la contrainte en cisaillement inter-laminaire pour un mode de rupture de type II [22].

## 2. Résistance à l'impact

Dans de nombreuses études [11][12][10][14] [44][45] [46], il est souligné une meilleure résistance à l'impact des composites à base de tissus 3D interlocks chaînes par rapport aux tissus 2D laminés.

Nous avons constaté que la surface endommagée de la zone d'impact augmente avec la vitesse initiale de façon plus importante dans un composite à base de structure UD que pour un composite à base de tissu 3D interlock chaîne (Figure 42) [11], ce qui semble également être confirmé par l'observation d'une zone endommagée plus faible pour les renforts à base de tissus 3D interlocks chaînes et de laminés d'UDs contre une zone plus importante pour les renforts à base de tissus 2D empilés [47]. Ceci mène à une tolérance aux dommages par impact plus élevée des composites structuraux 3D par rapport aux composites 2D stratifiés [48].

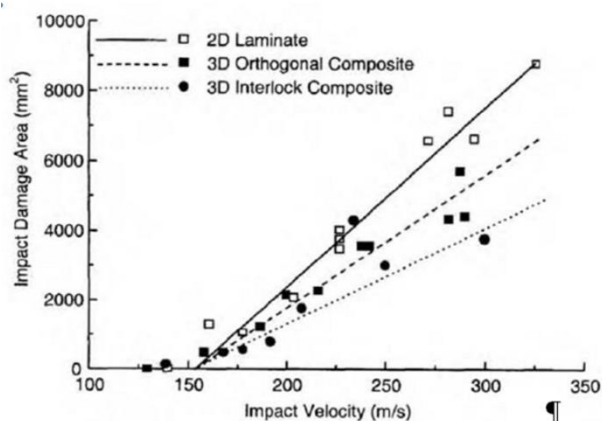


Figure 42. Influence de la vitesse d'impact sur les dimensions de surfaces endommagées des composites à base de laminés d'UD et de tissus 3D interlocks chaînes [11].

Cette aptitude à limiter la zone endommagée donne aux tissus 3D interlocks chaines une meilleure performance balistique lorsqu'ils sont soumis à de multiples impacts [49][50][51]. Cela confirme que le renforcement dans l'épaisseur d'un matériau 3D donne une meilleure résistance à la flexion après impact en diminuant le délaminage et en limitant la zone d'endommagement due à l'impact. Une augmentation de la résistance en compression après impact pour les composites à base de tissus 3D interlocks chaines par rapport aux tissus 2D a été constatée, ce qui se révèle être le phénomène inverse avant impact (Figure 43) [12].

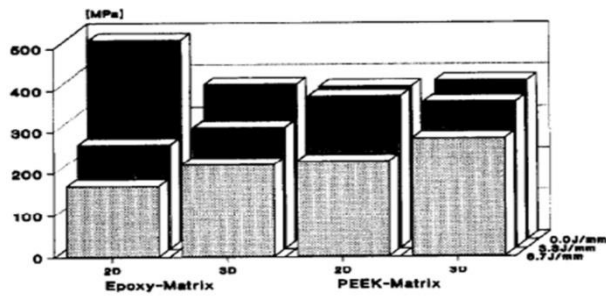


Figure 43. Influence du renfort textile et de la résine sur la contrainte en compression avant et après impact [22].

## B. Inconvénients en termes de propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines

La valeur du module d'Young peut être réduite de 10 à 35% pour certaines préformes 3D par rapport aux tissus 2D avec un taux de fibres quasi similaire [12]. Cette diminution serait en partie due à l'ondulation des fils de chaîne de liage mais aussi des endommagements des fils pendant le tissage. Cependant, ces résultats ne sont pas généralisables pour toutes les structures 3D. En effet, le module d'Young peut varier et surpasser ceux des tissus 2D en augmentant le taux de fibres dans la structure tissée (Figure 44) [12].

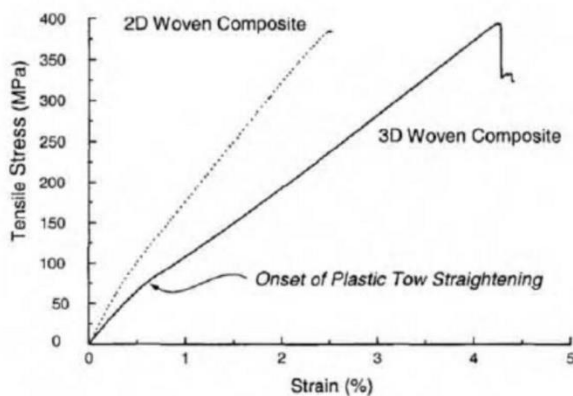


Figure 44. Comparaison des valeurs de contrainte en traction par rapport à l'allongement pour des composites à base de tissus 2D et 3D interlocks chaines [12].

La valeur de résistance à la compression avant impact est plus faible pour les composites à base de tissus 3D interlocks chaines que pour des composites à base de laminés d'UDs (Figure 45) [12]. Cette baisse est due aux ondulations et à la charge exercée sur les fils dans la direction de l'épaisseur. Les tissus 3D interlocks chaines présentent une faiblesse en compression axiale à cause des nœuds et des charges exercées sur les fils. Les fils entrent alors en rotation sous l'action de la charge jusqu'à ce qu'ils deviennent instables et cassent. Il est intéressant de noter que les composites à base de tissus 3D interlocks chaines ont un comportement plus élastique en compression mais résistent à une charge plus faible que les composites à base de tissus 2D [12].

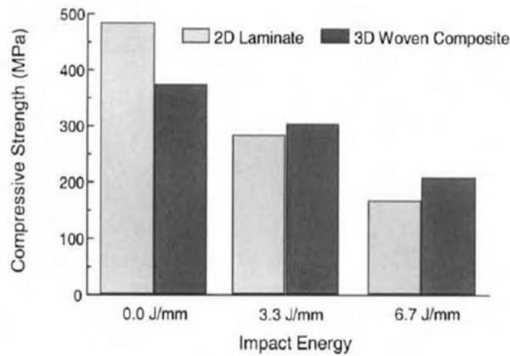


Figure 45. Comparaison des valeurs de résistance à la compression avant et après impact pour des composites à base de laminés d'UD et de tissus 3D interlocks chaines [12].

Ainsi, le taux de fibres situées dans la direction de l'épaisseur n'influence pas les propriétés en tension des différents tissus 3D interlocks chaines ni les propriétés en compression et cisaillement. Pour un taux de fibres équivalent, seule la géométrie de la structure semble avoir une influence sur les propriétés de compression et de cisaillement. De plus, pour différents taux de fibres (4 et 9%) la différence de propriétés mécaniques n'apparaît pas significative [14].

L'étude menée sur des tissus 2D empilés et deux tissus 3D interlocks orthogonaux à liage couche à couche et à liage à travers l'épaisseur a démontré que le module et la résistance en cisaillement dans le plan du tissu possèdent des valeurs plus grandes pour l'empilement de tissus 2D, puis le tissu 3D interlock chaîne orthogonal en liage couche à couche et enfin le tissu 3D interlock chaîne orthogonal en liage à travers l'épaisseur [52].

Ainsi, l'introduction d'un fil dans l'épaisseur de la structure tissée multi-couche apporte des propriétés fortement anisotropes [14] et peut réduire certaines propriétés du matériau; tels que la dureté dans le plan, la résistance à la fatigue, le module d'Young dans le plan et la résistance à la traction. L'introduction du fil dans l'épaisseur doit se faire de façon appropriée afin de limiter les ondulations [25], les frottements inter-fibres [27] et les tensions appliquées pendant le tissage [53] ainsi que la perte de résistance du composite à la fatigue [11].

### C. Mesure in-situ lors de la caractérisation d'un tissu 3D interlock chaîne résiné

Dans le cadre des travaux de recherche de Nauman [4], nous avons pu suivre le comportement en flexion 3 points quasi-statique et dans l'épaisseur d'un tissu 3D interlock chaîne par le biais de deux fils capteurs innovants insérés in-situ dans la structure lors de l'étape de fabrication du tissu.

Pour cela, à partir d'un tissu 3D interlock chaîne de type orthogonal et de liage en couche à couche avec un pas de liage de 1, une profondeur de liage de 1 et 13 couches (Interlock O - Liage L 1-1-12) à base de fils de carbone 6K-IM7 de titrage 200 Tex, nous avons inséré dans le sens des fils de trame deux fils capteurs piezo-résistifs [54] au sein de la structure tissée (Figure 46 - gauche), l'un en position haute pour mesurer le comportement en compression et l'autre en position basse pour mesurer le comportement en traction (Figure 46 - milieu). Le test de flexion 3 points a été réalisé sur une machine de type Instron 1185, selon la norme NF EN ISO 14125: 1998 [55] à une vitesse de 5 mm/min ( $0,083 \times 10^{-3}$  m/s), sur des échantillons de tissu 3D interlock chaîne carbone résinés de  $25 \times 2,5$  cm et d'épaisseur 0,85 cm (Figure 46 - droite) [56].



Figure 46. (gauche) position des fils capteurs au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne - (milieu) fils de trame insérés dans le tissu 3D interlock chaîne (Interlock O - L 1-1-13) - (droite) échantillon résiné soumis à un test de flexion 3 points quasi-statique dans l'épaisseur.

Nous avons superposé les courbes de mesure de changement de résistivité  $\Delta R/R$  des deux fils capteurs avec la courbe de charge en flexion 3 points appliquée sur le tissu 3D interlock chaîne résiné (Figure 47) [57]. Lors du déplacement initial et continu de la charge, nous avons confirmé le comportement en compression du fil capteur situé en position haute par une diminution progressive et continue de sa valeur de résistivité, et un comportement en traction du fil capteur situé en position basse de la structure tissée par une augmentation progressive et continue de sa valeur de résistivité. Cette continuité de comportement de la structure tissée 3D interlock chaîne résiné tend à montrer ainsi toute son intégrité lors d'une sollicitation

dans l'épaisseur lors d'un test de flexion 3 points du renfort fibreux, ce qui laisse présumer une ligne de charge neutre au sein de la structure correspondant à un minimum de modification de la géométrie de la structure tissée 3D interlock chaîne [58]. De la même façon, la détection des pertes de charge de la structure tissée 3D interlock chaîne résinée, initiée par la rupture des fils de carbone et le délaminage fibre/matrice, provoque une discontinuité de comportement par palier, ce qui induit une influence de la géométrie du tissu 3D interlock chaîne sur le mode de rupture global du renfort fibreux.

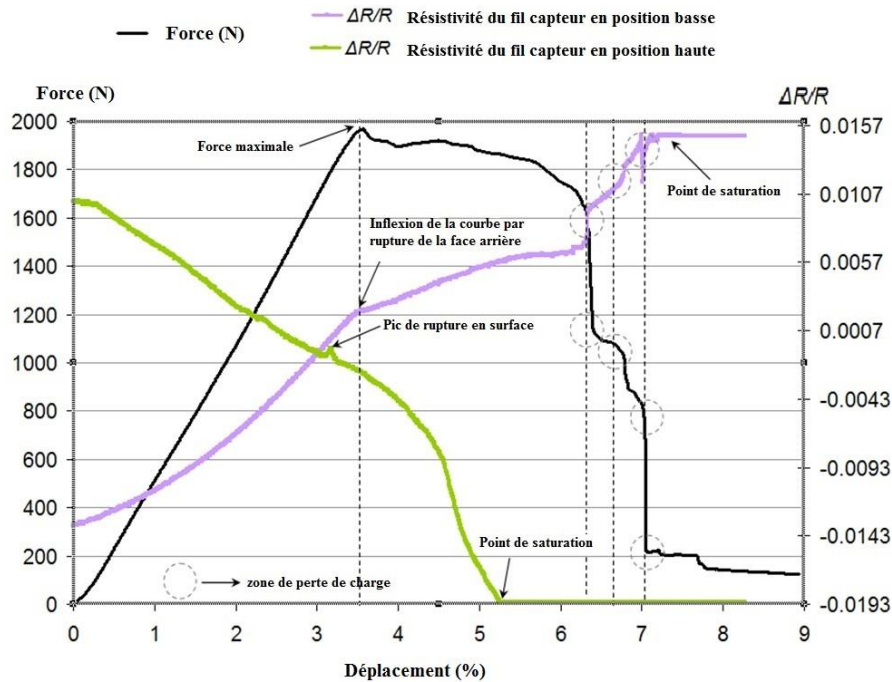


Figure 47. Représentation du comportement en flexion 3 points quasi-statique dans l'épaisseur du tissu 3D interlock chaîne carbone résiné par les mesures in-situ des deux positions des fils capteurs piezo-résistifs.

Les modifications de géométrie de la structure tissée 3D interlock chaîne résinée semblent limitées par la rigidité de la résine au sein de la structure; ce qui nous a conduit à étudier la déformation initiale du tissu 3D interlock chaîne pour mieux comprendre les changements d'orientation des fils au sein de la structure.

#### D. Conclusion sur les propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaînes

En considérant l'ensemble de ces résultats, la diversité des paramètres produits définissant la géométrie d'un tissu 3D interlock chaîne ne permet pas d'identifier des propriétés spécifiques; mais peut conduire à définir des tendances fortes en terme de comportement mécanique. Ainsi, l'influence de l'architecture du tissu 3D interlock chaîne sur les propriétés mécaniques dans les 3 directions principales définies par : les fils de chaîne de renfort, les fils de trame et les fils de liage dans l'épaisseur; permet d'aboutir à une structure intégrée et monolithique tout en se révélant fortement anisotrope en termes de propriétés.

Cependant, par le biais de notre analyse bibliographique et également selon nos propres résultats de recherche, nous avons pu identifier les propriétés mécaniques dominantes des tissus 3D interlocks chaînes telles que: la résistance au délaminage et la résistance à l'impact. Bien qu'ayant apporté une première explication succincte de la combinaison globale et locale des déformations du tissu 3D interlock chaîne soumis à l'impact, nous aborderons plus en détails, dans la suite du document, l'influence, aux échelles du fil et de la structure tissée, des paramètres influant sur la diffusion de l'énergie d'impact et son mode d'absorption par le tissu 3D interlock chaîne.

Comme indiqué par certains travaux de recherche, nous avons également confirmé, par nos propres travaux de recherche, l'influence du procédé de fabrication sur la dégradation des fils conduisant à une diminution importante des propriétés mécaniques résiduelles à la fois en tant que renfort fibreux seul mais également intégré dans un matériau composite. Nous aborderons plus en détails, dans la suite du document, la mesure de cette dégradation dans le cadre de la fabrication de différents tissus 3D interlocks chaînes et nous préciserons les innovations apportées sur les procédés de fabrication pour en minimiser la dégradation.

## IV. Pliage et mise en forme des tissus 3D interlocks chaînes

Le liage des fils de chaîne dans l'épaisseur du tissu 3D interlock chaîne apporte une intégrité globale à la structure tissée monolithique. Cependant, en fonction de la géométrie, du nombre de couches de fils de trame, du type de fil utilisé et des valeurs de densité des fils de chaîne et trame; les tissus 3D interlocks chaînes ont la possibilité de se déformer, plus ou moins selon les directions du tissu, pour s'adapter à des formes plus ou moins complexes tout en conservant des propriétés



géométriques et/ou mécaniques. Ainsi, dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons validé la capacité de pliage/drapage d'une structure tissée 3D interlock chaîne afin de s'adapter aux formes géométriques spécifiques des moules des préformes de matériaux composites.

### A. Pliage dans l'épaisseur d'un tissu 3D interlock chaîne

Initialement, le pliage dans l'épaisseur d'un tissu 3D interlock chaîne (mouldability [59]) a été étudié, en raison de la faible valeur de rigidité en cisaillement dans le sens des fils de chaîne de liage pour des tissus 3D interlocks chaînes de type d'angle à liage à travers l'épaisseur. Il a été montré que le nombre de couches de fils de trame et les valeurs des densités en fils de chaîne et trame influent directement sur cette capacité de pliage du tissu 3D interlock chaîne à base de fils de verre E.

Ainsi, dans le cadre de nos travaux de recherche [60][61][62], nous avons également observé le comportement en déformation quasi-statique de la géométrie initiale à différentes étapes du pliage jusqu'à la forme finale, afin de comprendre le comportement dans l'épaisseur de la géométrie du tissu 3D interlock chaîne par des observations en coupe des fils de trame, pour mesurer l'évolution des fils de chaîne, et par des observations en coupe des fils de chaîne, pour détecter les changements de position.

Pour cela, à partir d'un tissu 3D interlock chaîne de type interlock d'angle et liage couche à couche avec un pas de liage de 3, une profondeur de liage de 2, 9 couches, deux fils de chaîne de surface en liage toile (interlock A - Liage L 3-2-9), à base de fils de carbone de type 8K en chaîne et trame (Figure 48), nous avons plié le tissu 3D interlock chaîne depuis une forme initiale à plat jusqu'à un retournement complet sur lui-même, en passant par quatre étapes de déformation (Figure 49). A chaque étape, un échantillon de tissu a été imprégné, dans une résine à faible viscosité, afin de figer la géométrie du renfort fibreux et procéder à des coupes successives des fils de trame pour observer les différentes évolutions des fils de chaîne au sein de la structure tissée 3D.

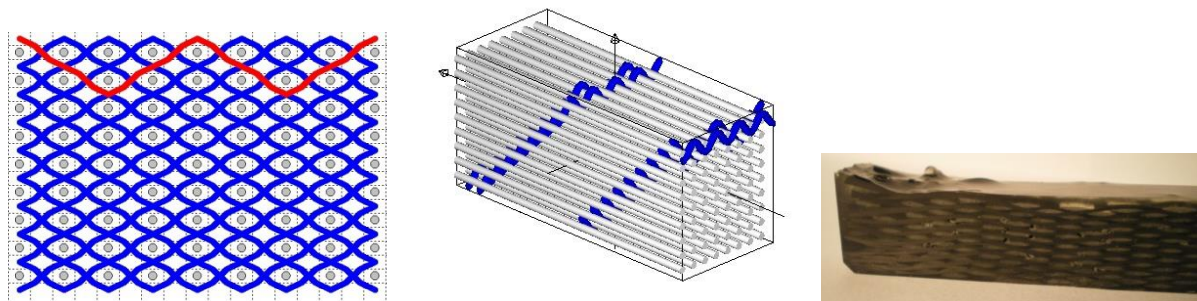


Figure 48. (gauche) Représentation géométrique en coupe des fils de trame - (milieu) Représentation géométrique 3D (évolution des fils de chaîne) - (droite) tissu 3D interlock chaîne résiné de type A - liage L 3-2-9.

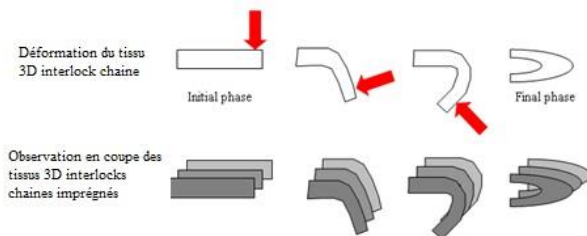


Figure 49. Processus de déformation du tissu 3D interlock chaîne et observations en coupe des fils de trame de l'évolution des fils de chaîne des tissus 3D interlocks chaînes imprégnés.

Au cours du processus de tissage de ce tissu 3D interlock chaîne de type interlock A - Liage L 3-2-9, les fils de trame ont été insérés par colonne pour constituer l'épaisseur de la structure tissée et selon un pas régulier d'insertion, dépendant ici de l'effort constant fourni par l'opérateur au cours du tissage du peigne et insertion manuelle des fils de trame dans le tissu 3D interlock chaîne (Figure 50).

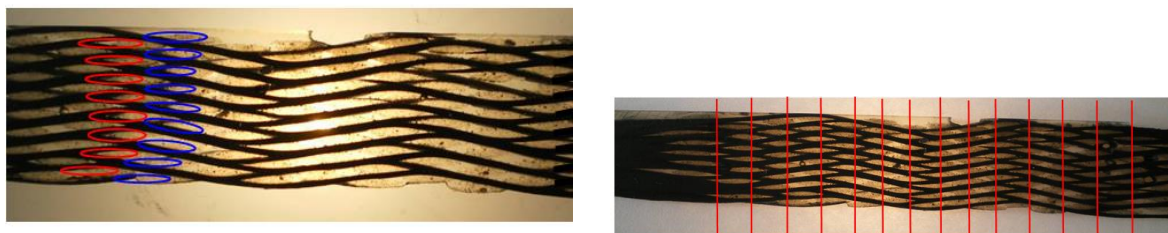


Figure 50. (gauche) disposition des colonnes de fils de trame en coupe - (droite) représentation des pas d'insertion des colonnes de fils de trame.

Nous avons observé une modification de l'orientation des colonnes de fils de trame en fonction de la contrainte de cisaillement pur exercée, de part et d'autre de la structure tissée, dans la direction des fils de chaîne de liage et dans les deux sens opposés (Figure 51). Ainsi, un état d'équilibre est atteint à la phase finale de la déformation du tissu 3D interlock chaîne qui se traduit par une conservation de l'intégrité de la structure tissée et une modification locale des géométries de section des fils de chaîne et trame pour s'adapter aux différentes contraintes exercées dans l'épaisseur du tissu 3D interlock chaîne.

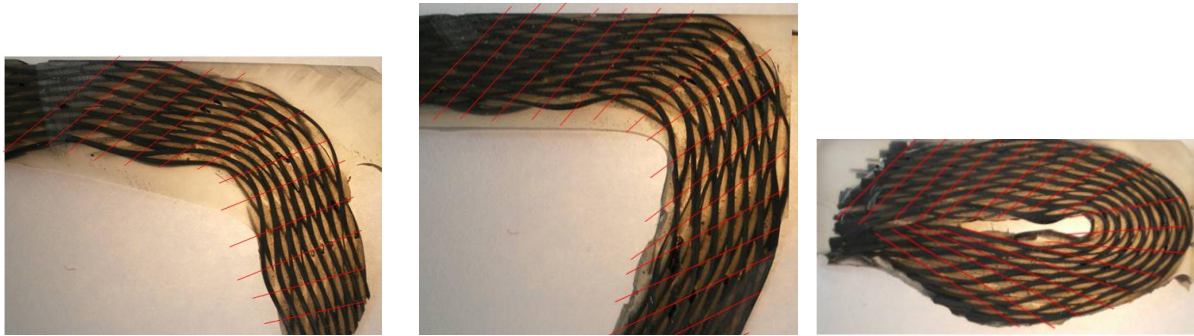


Figure 51. Vues en coupe des fils de trame lors des différentes étapes de pliage des tissus 3D interlocks chaînes (gauche) inférieur à  $90^\circ$  - (milieu) supérieur à  $90^\circ$  - (droite) à  $180^\circ$ .

L'observation, à l'échelle des filaments de carbone, de la section du fil de trame localisé au même endroit de liage dans l'épaisseur de la structure tissée 3D interlock chaîne mais à deux états différents de déformation, aboutit à une compaction des filaments au sein du fil, résultant de l'augmentation des contraintes de compression exercées par les deux fils de chaîne de liage assurant la liaison entre les deux couches successives (Figure 52).

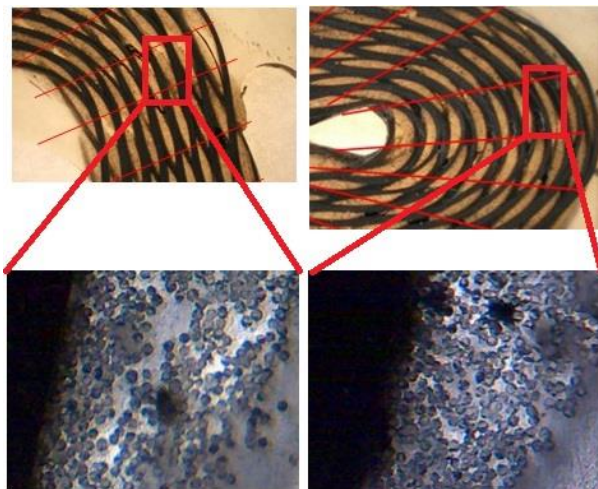


Figure 52. Observations d'une partie de la section d'un fil de trame à l'échelle des filaments du fil de carbone à différentes phases de la déformation du tissu 3D interlock chaîne (gauche) pliage inférieur à  $90^\circ$  - (droite) pliage à  $180^\circ$ .

Dans le cadre de nos travaux de recherche [29][63], nous avons augmenté le nombre de couches de la structure 3D interlock chaîne et vérifié que l'épaisseur du tissu avait une influence sur la déformation de la géométrie initiale lors du procédé de pliage dans la direction des fils de trame. Cette vérification a été effectuée en utilisant un tissu 3D interlock chaîne possédant un maximum de nombre de couches, de type orthogonal à liage couche à couche de pas d'insertion de 1 et de profondeur de liage de 2 en 13 couches; Interlock O - Liage L 1-2-13 (Compte chaîne : 24 fils/cm avec des fils de carbone 6K - 200 Tex; Compte trame : 13 fils de trame/cm par couche avec des fils de verre R - 320 Tex de type RC14 320 P109).

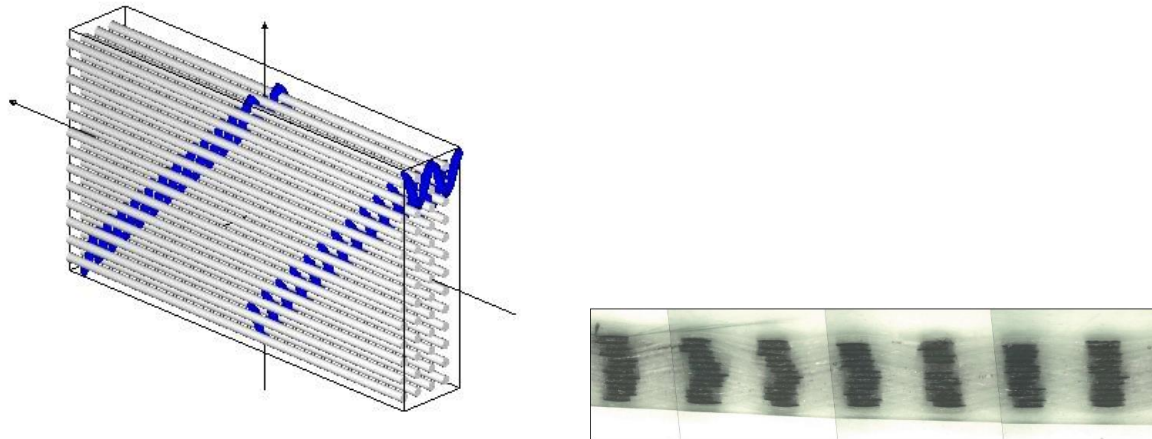


Figure 53. (gauche) Représentation 3D de l'interlock O - Liage L 1-2-13 - (droite) vue en coupe des fils de chaîne de liage et leur disposition régulière sous forme de colonnes de fils de carbone pour le tissu 3D interlock chaîne.

Après pliage des différents échantillons du tissu 3D interlock chaîne de type interlock O - liage L 1-2-13, nous avons constaté un équilibre dans la répartition des contraintes de cisaillement pur dans le sens des fils de trame, conduisant à une modification, répartie à part égale, entre les deux parties symétriques du tissu (Figure 54).



Figure 54. Vues en coupe des fils de chaîne des différentes étapes en pliage des tissus 3D interlocks chaînes (gauche) à 135° - (droite) à 180°.

Nous avons observé que la structure tissée 3D interlock chaîne se déforme par glissement sens trame, des fils de chaîne disposés au sein d'une même colonne d'insertion couche à couche des fils de chaîne de liage, ce qui implique des contraintes de cisaillement plus prononcées aux extrémités du tissu plié (Figure 55). Nous pouvons en déduire la présence simultanée, au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne, de lignes de concentration de contraintes maximales en traction pour les fils situés sur le plus grand rayon de courbure de pliage et en compression pour les fils situés sur le plus petit rayon de courbure de pliage (Figure 55).

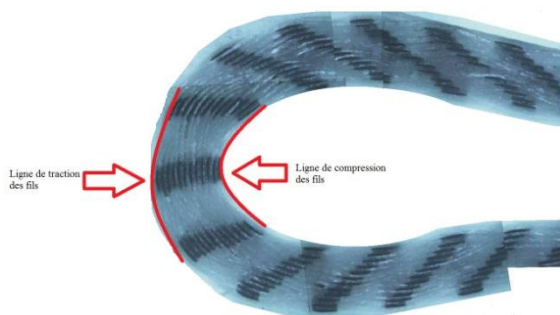


Figure 55. Représentation des lignes de contrainte maximale du tissu 3D interlock chaîne lors de l'étape de pliage.

Nous avons pu observer ce même phénomène lors des essais en flexion 3 points quasi-statique et dans l'épaisseur d'un tissu 3D interlock chaîne par des mesures in-situ de ces deux types de contraintes simultanées au sein de la structure tissée [4].

## B. Mise en forme d'un tissu 3D interlock chaîne dans la direction de l'épaisseur

Dans le cadre de nos récents travaux de recherche [64][28][65][66], nous avons observé le mode de déformation d'un tissu 3D interlock chaîne lors d'essais de mise en forme 3D. Cet essai de préformage du renfort sec sur une géométrie imposée par le poinçon s'opère à des vitesses faibles, soit en quasi-statique. Nous avons, à partir des mêmes paramètres produits du tissu 3D interlock chaîne, fait varier les architectures de liage et mesurer l'influence de la géométrie initiale sur la capacité de mise en forme par le biais de différents critères.

Pour cela, nous avons eu recours à un banc de préformage [67] qui nous permet de déformer, dans la direction de l'épaisseur, le tissu 3D interlock chaîne, fixé dans les deux directions chaîne et trame par le biais de mors montés sur des vérins pneumatiques exerçant une pression suffisante (0,2 MPa). La surface de tissu en contact est suffisamment conséquente pour limiter le cisaillement du tissu sur les bords des mors, et éviter tout glissement lors de la déformation du tissu par un poinçon, également fixé sur un vérin pneumatique pour assurer une déformation du tissu à vitesse quasi-statique et constante ( $2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ) (Figure 56).

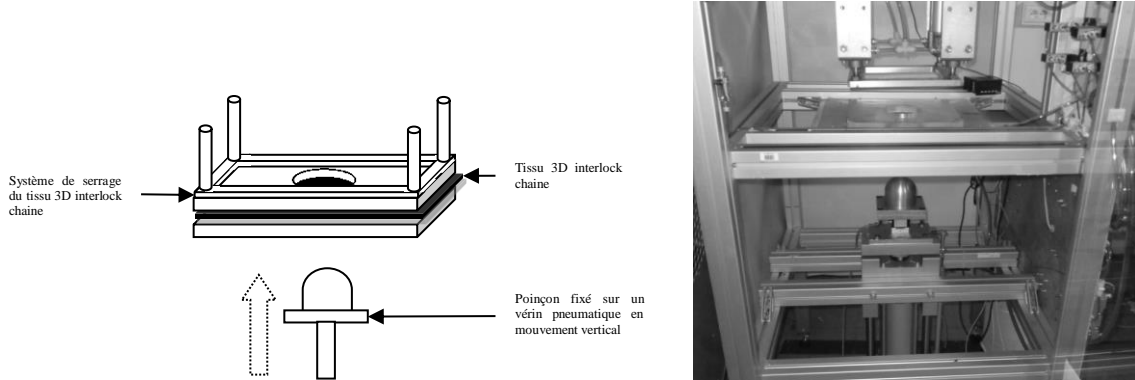


Figure 56. Procédé de mise en forme quasi-statique dans l'épaisseur d'un tissu 3D interlock chaîne (gauche) principe de fonctionnement - (droite) représentation du banc de test et son instrumentation associée.

Ce banc d'essai possède différents types de réglages, tels que : la pression de serre-flan, la vitesse du poinçon au cours du processus de formage; et permet d'effectuer différentes mesures, telles que : la position et les forces appliquées par le poinçon ainsi que l'observation du suivi de la déformation à température ambiante du tissu 3D interlock chaîne, par le biais d'une caméra positionnée à la verticale et au-dessus de l'échantillon testé.

Différentes études ont montré l'influence de mise en forme en température [68][69] ou à température ambiante [70], ainsi que de la vitesse de déformation [70][69]. D'autres études ont été réalisées sur différents types de matériaux tels que; des tissus 2D non imprégnés [69] [71], des tissus 2D imprégnés [68][70] et des structures uni-directionnelles empilées (NCF) [72]. Plus spécifiquement pour les tissus, l'influence de la géométrie initiale du tissu 2D a été démontrée pour des liages de type toile [73], sergé [73][69][68][70] et satin [73][68]; mais également l'influence de l'orientation initiale du tissu 2D, lors du montage sur le banc de test, sur les déformations anisotropes dans les directions chaîne et trame du tissu 2D [71].

Lors de la mise en forme d'un tissu, les directions et intensités des forces exercées dans les deux directions du tissu conduisent à un réarrangement local des fils entre eux dépendant de la géométrie initiale, des densités des fils de chaîne et trame et des valeurs de résistance des fils. Ceci se traduit par différents phénomènes physiques observables, à une échelle globale par une consommation des fils dans l'épaisseur du plan du tissu conduisant à des valeurs différentes selon les directions chaîne et trame [74] [75] [76], et à une échelle locale conduisant à un changement d'angle de position entre les fils de chaîne et trame [77]. Dans ces études numériques et expérimentales [78][79][80][81][82][83][84][85][86][87], portant sur l'analyse des déformations et des défauts lors de la mise en forme des renforts secs, nous pouvons constater que les travaux sur les renforts épais multi-couches ou les tissus 3D interlocks chaînes apparaissent peu nombreux [88][89][90][91][92]. L'influence de l'architecture complexe des tissus 3D interlocks chaînes sur la déformabilité lors des essais de mise en forme fait l'objet des travaux décrits dans cette partie.

Ainsi, comme préconisé par différentes études [73][68][93][94], nous avons effectué dans le cadre de nos travaux de recherche des mesures : de variation d'épaisseur, de rétrécissement dans les deux directions du tissu, de glissement entre les couches extérieures du tissu 3D interlock chaîne et d'angles de cisaillement entre les fils de chaîne et trame.

Pour cela, dans le cadre des travaux de recherche en cours de Dufour [95], nous avons débuté ces travaux de recherche par une mesure des déformations du tissu 3D interlock chaîne en utilisant un poinçon hémisphérique sur trois types d'architectures afin de montrer l'influence de la géométrie sur le comportement de la structure lors de la mise en forme.

Par la suite, nous avons utilisé un poinçon de forme prismatique pour effectuer des déformations asymétriques du tissu 3D interlock chaîne et confirmer les capacités de mise en forme de l'architecture de tissu précédemment identifiée comme étant plus adaptée à la déformation symétrique.

## C. Mise en forme symétrique du tissu 3D interlock chaîne

Le poinçon hémisphérique (Figure 57 - gauche) a été utilisé pour analyser le comportement en déformation du tissu 3D interlock chaîne et vérifier l'anisotropie de propriété (Figure 57 - milieu). Les déformations locales et globales des échantillons préformés peuvent être contrôlées par le suivi des positions des fils de chaîne et trame localisés sur les surfaces extérieures du tissu 3D, telles que représentées par les différents points (Figure 57-droite) indiqués sur les deux surfaces du tissu initialement non déformé. Les trois premiers points sont situés le long de la médiane du tissu en direction chaîne, le



quatrième point correspond à l'intersection des deux médianes du tissu, et les trois derniers points se situent le long de la médiane du tissu en direction trame.

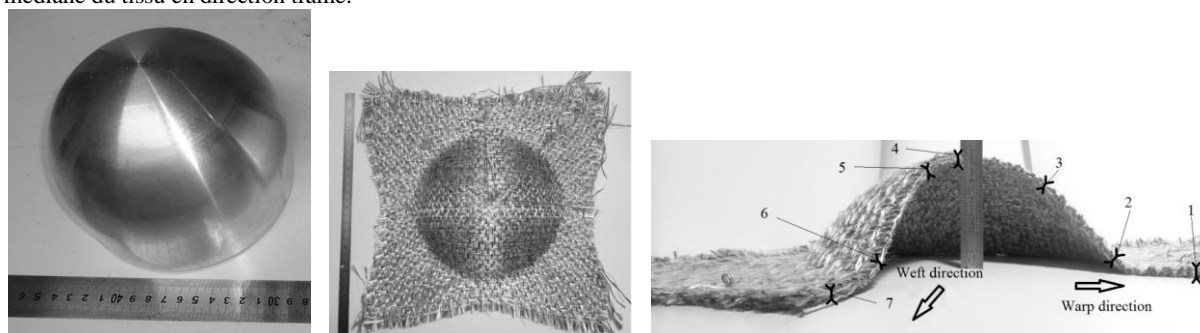


Figure 57. (gauche) représentation du poinçon hémisphérique - (milieu) tissu interlock 3D chaîne déformé - (droite) localisation des points de mesure sur les deux surfaces du tissu 3D interlock chaîne.

Nous avons réalisé des tissus 3D interlocks chaînes à base de fils comelés de titrage 360 Tex (verre E (82,9% en masse)/polypropylène (17,1%)) avec des réductions de 18 fils/cm pour les fils de chaîne de liage et 18 fils/cm pour les fils de chaîne de renfort et de 3 fils/cm et par couche pour les fils de trame. Les trois types d'architectures utilisés en 6 couches sont : l'interlock O - liage T 2-2-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort, l'interlock O - liage L 2-6-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort, et l'interlock A - liage T 11-6-6 base sergé de 12 effet trame cordon à droite avec fils de chaîne de renfort (Tableau 12).

Tableau 12. Représentations en coupe et vues 3D des architectures des trois tissus 3D interlocks chaînes

Tissu interlock O - liage T 2-6-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort	Tissu interlock O - liage L 2-2-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort	Tissu interlock A - liage T 11-6-6 base sergé de 12 effet trame cordon à droite avec fils de chaîne de renfort
"Orthogonal"	"Layer-to-layer"	"Through-the-thickness"

#### 1. Mesure de la variation d'épaisseur

Les valeurs d'épaisseur ont été mesurées à chacun des 7 points repérés sur la surface du tissu (Figure 57 - droite) pour les trois types d'architecture (Tableau 13), et sont représentées en Figure 58.



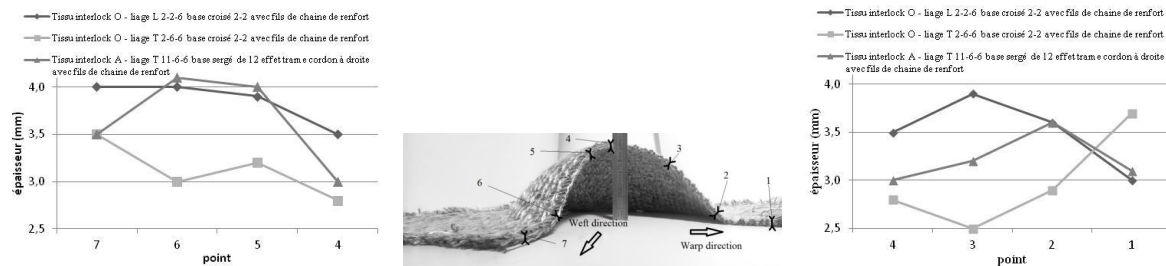


Figure 58. Représentation dans la direction des fils de trame (gauche) et chaîne (droite) des valeurs des épaisseurs des trois architectures des tissus 3D interlocks chaînes déformés symétriquement et mesurées (milieu) aux sept points de la préforme.

## 2. Mesure de l'avalement dans les deux directions du tissu

Les valeurs de l'avalement du tissu ont été mesurées dans les sens chaîne et trame, depuis le centre jusqu'aux deux bords du tissu, pour les trois types d'architecture (Figure 59) et les valeurs indiquées, dans les sens chaîne et trame du Tableau 13, correspondent à la différence entre la valeur mesurée et la valeur initiale de 30 cm.

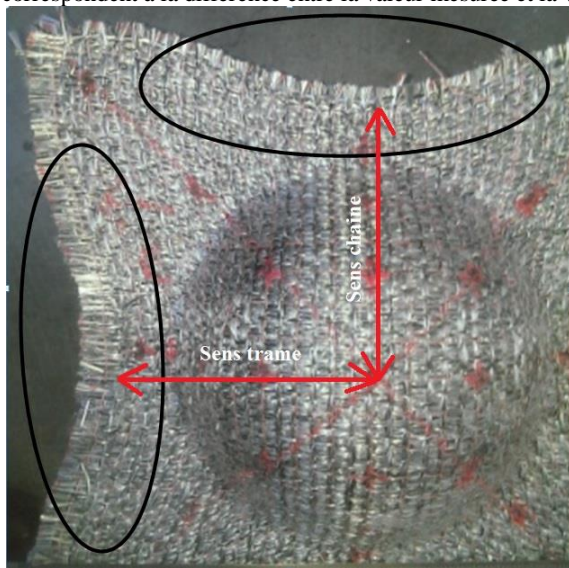


Figure 59. Mesure des valeurs d'avalement des tissus 3D interlocks chaînes dans les directions chaîne et trame.

## 3. Mesure du glissement entre les couches externes du tissu 3D interlock chaîne

La mesure des positions des points 1 à 7 du tissu (Figure 60 - droite), a été effectuée à l'aide de fils colorés insérés dans les sens chaîne et trame et pour chaque couche externe du tissu. Ainsi, la valeur de glissement entre couches (Tableau 13) correspond à la valeur de la projection des positions des deux points appartenant aux deux couches externes, initialement situés à la verticale l'un de l'autre, sur le plan médian du tissu [96].

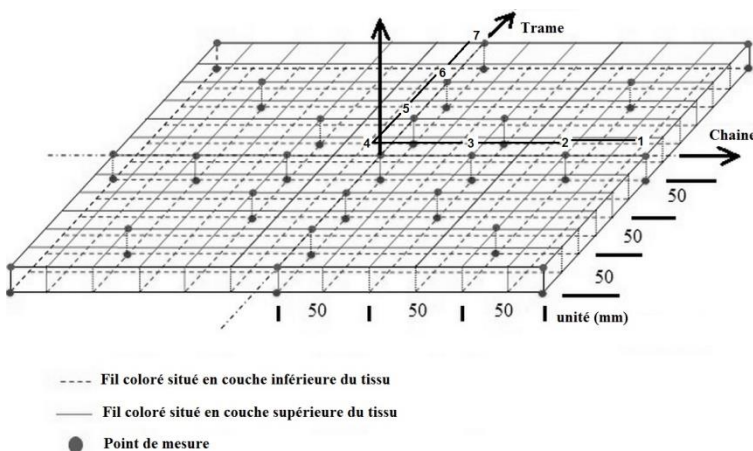


Figure 60. Disposition des 7 points de mesure situés sur chaque couche externe du tissu pour la mesure du glissement inter-couches.

#### 4. Mesure des valeurs d'angle de cisaillement entre les fils de chaîne et trame

Les angles de cisaillement en surface entre les fils de chaîne et de trame ont été mesurés pour chaque point de mesure du tissu 3D interlock chaîne et ont été regroupés par zones de valeurs identiques (Figure 61). Seules les mesures des angles de cisaillement ont été effectuées pour les tissus de type interlock O - liage T 2-2-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort et interlock O - liage L 2-6-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort; dit "Layer-to-layer".

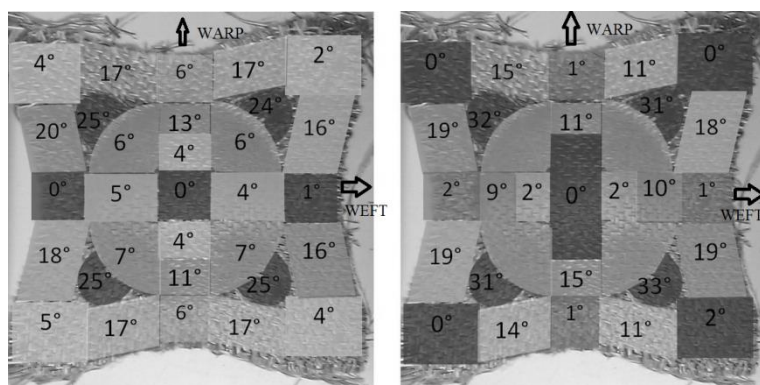


Figure 61. Représentations par zones de valeur identique de l'angle de cisaillement dans le plan des fils de chaîne et trame (gauche) pour le tissu interlock O - liage L 2-6-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort - (droite) pour le tissu interlock O - liage T 2-2-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort.

#### 5. Comparaison des valeurs de mesures effectuées sur les tissus 3D interlocks chaînes déformés

Les différentes valeurs mesurées des déformations des trois architectures différentes des tissus 3D interlocks chaînes ont été regroupées dans le Tableau 13 et permettent d'effectuer une comparaison en termes de différence de comportement à la mise en forme.

Tableau 13. Récapitulatif des mesures effectuées sur les trois architectures des tissus 3D interlocks chaînes déformés de façon symétrique.

Architecture	"Layer-to-layer"						
	Sens chaîne			Centre du tissu	Sens trame		
Numéro des points de mesure (Figure 57)	1	2	3	4	5	6	7
Épaisseur (mm)	3,0	3,6	3,9	3,5 (3,7 initiale)	3,9	4,0	4,0
Glissement entre couches externes (mm)	6,8	3,3	3,1	0,0	10,0	7,6	4,0
Angles de cisaillement (°)	6	13	4	0	4	4	1
Avalement du tissu (mm)	23,7				23,7		
Architecture	"Orthogonal"						
	Sens chaîne			Centre du tissu	Sens trame		
Numéro des points de mesure (Figure 57)	1	2	3	4	5	6	7
Épaisseur (mm)	3,7	2,9	2,5	2,8 (3,1 initiale)	3,2	3,0	3,5
Glissement entre couches externes (mm)	1,9	6,3	4,7	0,0	5,6	9,7	4,5
Angles de cisaillement (°)	1	11	0	0	2	10	1
Avalement du tissu (mm)	24,2				27,6		
Architecture	"Through-the-thickness"						
	Sens chaîne			Centre du tissu	Sens trame		
Numéro des points de mesure (Figure 57)	1	2	3	4	5	6	7
Épaisseur (mm)	3,1	3,6	3,2	3,0 (3,5 initiale)	4,0	4,1	3,5
Glissement entre couches externes (mm)	11,7	10,2	4,4	0,0	7,9	5,5	4,0
Angles de cisaillement (°)	Non mesurés						
Avalement du tissu (mm)	21,4				24,9		

Pour les trois architectures, nous observons une diminution de la valeur de l'épaisseur au sommet de chaque architecture de tissu par compression. Nous constatons également des valeurs plus importantes du glissement dans le sens trame que dans le sens chaîne pour les architectures "Orthogonal" et "Through-the-thickness" et une valeur identique pour l'architecture "Layer-to-layer" dans les deux directions du tissu.

Pour l'architecture "Layer to layer", nous observons une diminution de la valeur de l'épaisseur, par rapport à la valeur moyenne initiale, dans le sens chaîne au point situé à proximité des zones de contact avec les mors du banc de formage par compression locale; et une augmentation de la valeur de l'épaisseur, par rapport à la valeur moyenne initiale, dans le sens trame aux points situés dans la partie hémisphérique déformée du tissu par rapprochement des fils de chaîne et trame entre eux conduisant à un déplacement dans le sens de l'épaisseur. Nous avons également observé de plus fortes valeurs de glissement dans le sens trame que dans le sens chaîne et des valeurs inverses pour les angles de cisaillement. Ainsi, l'architecture "Layer-to-layer" apparaît plus homogène en comportement global de la structure, avec une légère influence des

fil de chaîne de liage sur le changement de géométrie finale, conduisant à des déformations locales des fils de chaîne et trame plus prononcés dans le sens trame vis à vis du glissement entre couches.

Pour l'architecture "Orthogonal", la réduction de l'épaisseur apparaît plus prononcée dans le sens chaîne; ce qui implique une augmentation de la valeur de l'épaisseur, par rapport à la valeur moyenne initiale, dans le sens chaîne et trame aux points situés à proximité des zones de contact avec les mors du banc de formage; et une diminution de la valeur de l'épaisseur, par rapport à la valeur moyenne initiale, dans le sens chaîne et trame aux points situés dans la partie hémisphérique déformée du tissu par compression locale. De façon globale, les valeurs de glissement entre couches externes semblent plus prononcées dans le sens trame que dans le sens chaîne, avec des valeurs identiques des angles de cisaillement dans les deux directions du tissu. Ainsi, l'architecture "Orthogonal" apparaît plus difficile à déformer dans le sens des fils de chaîne de liage tout en conservant une capacité de glissement des fils de trame entre eux au sein de la géométrie globale de la structure tissée.

Pour l'architecture "Through-the-thickness", nous constatons une diminution plus prononcée dans le sens chaîne que dans le sens trame de la valeur de l'épaisseur du tissu par rapport à la valeur moyenne initiale, ce qui semble être corrélée aux valeurs de glissement entre couches externes plus importantes, dans le sens chaîne, traduisant une influence plus importante des fils de chaîne de liage dans la modification de la géométrie finale dans le sens des fils de chaîne. Ainsi, l'architecture "Through-the-thickness" semble plus hétérogène en comportement global de la structure tissée.

En dépit du nombre limité de points de mesures effectuées sur les architectures des tissus 3D interlocks chaîne, l'influence des fils de chaîne de liage sur la géométrie finale suite à la mise en forme du tissu 3D interlock chaîne apparaît plus importante avec des valeurs de pas et de profondeur de liage plus grandes.

Aussi, l'architecture de type "Layer-to-layer" a été sélectionnée pour minimiser les hétérogénéités de comportement de la structure tissée lors de la mise en forme tissu 3D interlock chaîne par un poinçon à forme géométrique non symétrique.

#### D. Mise en forme asymétrique du tissu 3D interlock chaîne

De même, les déformations locales et globales, provoquées par un poinçon de forme géométrique asymétrique (Figure 62 - gauche) lors de la mise en forme des tissus 3D interlocks chaînes (Figure 62 - milieu), peuvent être contrôlées par le suivi des positions des fils de chaîne et trame localisés sur les surfaces extérieures du tissu 3D, telles que représentées par les différents points indiqués sur les deux surfaces du tissu initialement non déformé. Les trois premiers points sont situés le long de la médiane du tissu en direction chaîne, le quatrième point correspond à l'intersection des deux médianes du tissu, et les trois derniers points se situent le long de la médiane du tissu en direction trame (Figure 62 - droite).

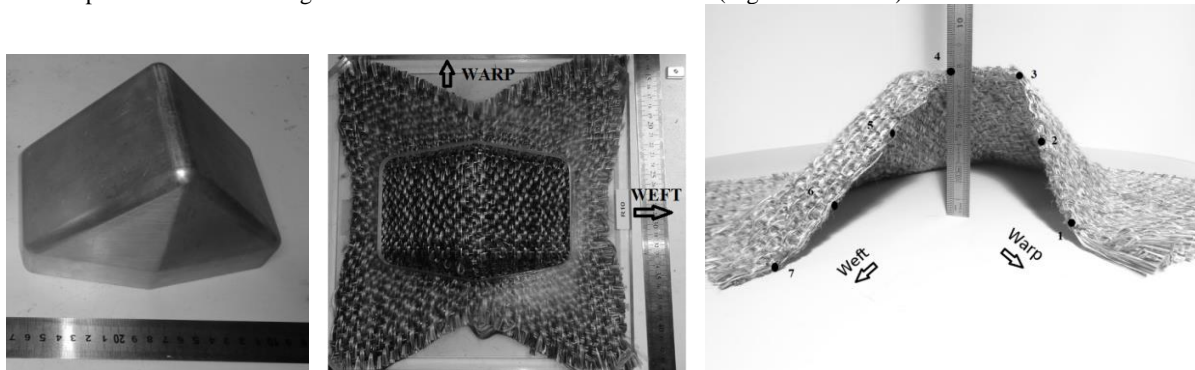
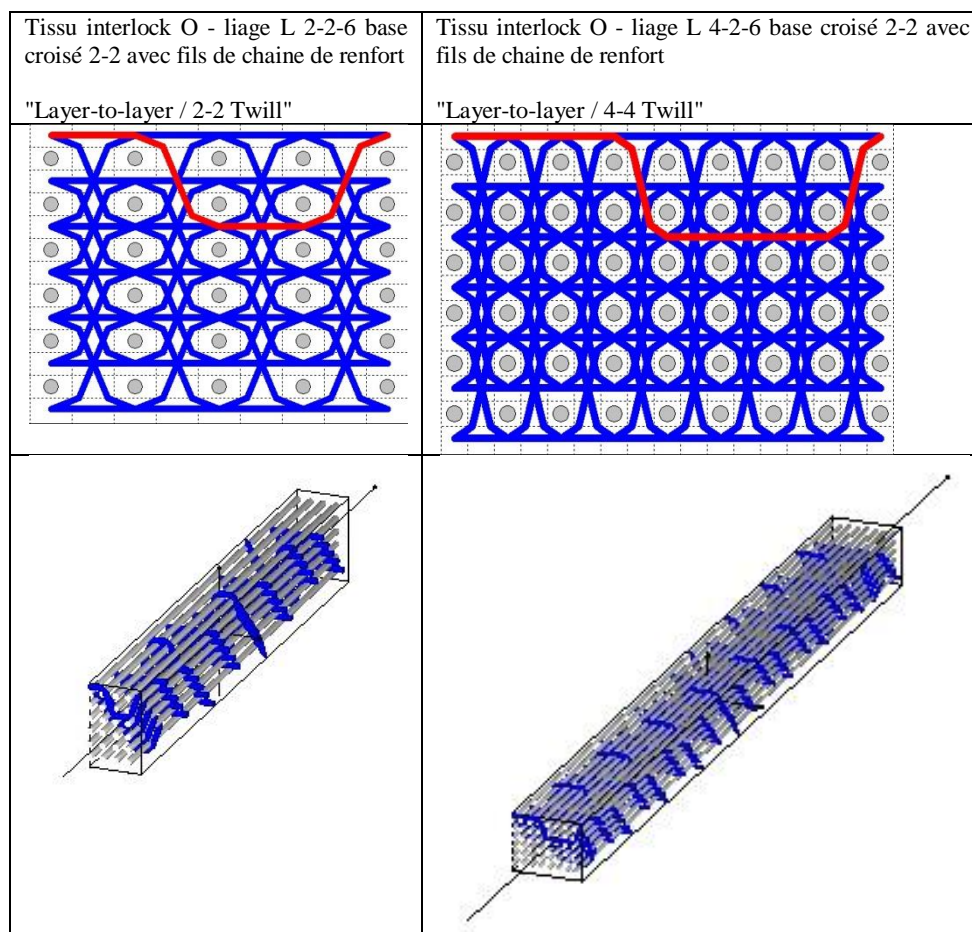


Figure 62. (gauche) représentation du poinçon prismatique - (milieu) tissu 3D interlock chaîne déformé - (droite) localisation des points de mesure sur les deux surfaces du tissu 3D interlock chaîne.

Nous avons réalisé des tissus 3D interlocks chaînes à base de fils comelés Twintex® de titrage 1100 dTex avec des réductions de 18 fils/cm pour les fils de chaîne de liage et 18 fils/cm pour les fils de chaîne de renfort et de 3 fils/cm et par couche pour les fils de trame. Les deux types d'architectures utilisés en 6 couches sont : l'interlock O - liage L 2-6-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort; dit "Layer-to-layer / 2-2 Twill" et l'interlock O - liage L 2-6-6 base croisé 2-2 avec fils de chaîne de renfort; dit "Layer-to-layer / 4-4 Twill" (Tableau 14). Cette dernière architecture possède moins de points de liage entre les fils de chaîne et trame ce qui facilite la consommation de la longueur des fils dans le tissu 3D interlock chaîne tout en préservant la disposition des fils dans la géométrie initiale.

Tableau 14. Représentations en coupe et vues 3D des architectures des deux tissus 3D interlocks chaines.



Les différentes valeurs mesurées des déformations asymétriques des deux architectures des tissus 3D interlocks chaines ont été regroupées dans le Tableau 15.

Tableau 15. Récapitulatif des mesures effectuées sur les deux architectures des tissus 3D interlocks chaines déformés de façon asymétrique.

Architecture	Layer-to-layer / 2-2 Twill						
	Sens chaîne			Centre du tissu	Sens trame		
Numéro des points de mesure (Figure 62)	1	2	3	4	5	6	7
Épaisseur (mm)	4,9	4,7	4,5	5,3	3,1	5,0	5,0
Glissement entre couches externes (mm)	10,7	18,9	17,9	0	14,2	21,8	16
Angles de cisaillement (°)	2	2	1	1	3	12	3
Avalement du tissu (mm)	43,6				15,5		
Architecture	Layer-to-layer / 4-4 Twill						
	Sens chaîne			Centre du tissu	Sens trame		
Numéro des points de mesure (Figure 62)	1	2	3	4	5	6	7
Épaisseur (mm)	5,5	4,3	4,1	4,8	4,7	4,9	5,5
Glissement entre couches externes (mm)	7,2	9,7	9,1	0,0	14,0	17,2	13,7
Angles de cisaillement (°)	1	2	0	3	3	20	2
Avalement du tissu (mm)	50,0				22,4		

Pour les deux architectures des tissus 3D interlocks chaines, les valeurs d'avalement du tissu sont beaucoup plus importantes dans le sens chaîne que dans le sens trame, correspondant à la plus forte pente du poinçon prismatique; avec des valeurs légèrement plus importantes pour l'architecture "Layer-to-layer - 4-4 Twill" que pour l'architecture "Layer-to-layer - 2-2 Twill". Le même comportement global à la mise en forme dans l'épaisseur du tissu 3D interlock chaîne peut être constaté pour les deux architectures avec des valeurs de glissement entre les couches externes dans les sens chaîne et trame plus faibles pour l'architecture "Layer-to-layer - 4-4 Twill" que pour l'architecture "Layer-to-layer - 2-2 Twill". Cela confirme que la diminution du nombre de points de liage entre les fils de chaîne et trame de la structure tissée 3D interlock chaîne pour l'architecture de type "Layer-to-layer" favorise la consommation des fils au sein de la structure tout en conservant l'intégrité de la géométrie initiale de façon globale.



## E. Conclusion sur la mise en forme des tissus 3D interlocks chaines

Dans le cadre de nos différents travaux de recherche [56][63][64], nous avons montré les capacités de déformation des architectures de tissus 3D interlocks chaines lors des procédés de pliage et de mise en forme dans l'épaisseur. Les premiers résultats obtenus nous montrent l'influence combinée à la fois du pas et de la profondeur de liage sur l'anisotropie de propriétés des architectures testées. Ainsi, l'architecture tissée 3D proche du type de liage couche à couche avec une profondeur de liage limitée et présentant un nombre réduit de points d'entrecroisement des fils de chaîne et trame, permet de conserver l'intégrité et l'homogénéité de la géométrie initiale par une consommation des fils de chaîne et trame au sein de la structure tissée.

Les variations observées des épaisseurs des tissus 3D interlocks chaines montrent également des comportements locaux entre les fils de chaîne et les fils de trame conduisant soit à une déformation hors du plan du tissu ou soit une compression du tissu. L'utilisation d'un renfort fibreux de type tissu 3D interlock chaîne nécessite l'application d'un effort de compression globale lors du processus d'imprégnation par de la résine afin de minimiser l'hétérogénéité de répartition de la résine dans les différentes zones du tissu 3D interlock chaîne ainsi déformé.

Dans le cadre de nos travaux de recherche, les tissus 3D interlocks chaines utilisés pour les procédés de pliage et de mise en forme dans l'épaisseur, possèdent des densités fixes des valeurs de réduction chaîne et trame ainsi que des valeurs de titrage des fils de chaîne et trame; mais aussi une même géométrie initiale.

## V. Synthèse

Dans le cadre des différents travaux de recherche menés sur les tissus 3D interlocks chaines, nous avons synthétisé les différentes propriétés des tissus 3D interlocks chaines, ainsi que leurs avantages et inconvénients, sous l'angle de leur procédé de fabrication, de leur architecture et de leurs différentes propriétés mécaniques. Il ressort comme avantage principal deux propriétés mécaniques dominantes des tissus 3D interlocks chaines telles que: la résistance au délaminage et la résistance à l'impact. Nous avons souligné l'influence du procédé de fabrication sur la dégradation des fils conduisant à une diminution importante des propriétés mécaniques résiduelles des tissus 3D interlocks chaines.

De part, le type de renforcement dans l'épaisseur par un fil de chaîne de liage, nous avons montré la capacité de la structure tissée 3D multi-couche à se déformer au niveau global sans modifier l'intégrité initiale fournie par la géométrie du tissu 3D interlock chaîne. En considérant un type de pliage de type couche à couche à faible profondeur de liage, nous avons montré la conservation de cette intégrité lors de déformation à vitesse quasi-statique démontrant ainsi une capacité de pliage et de mise en forme entraînant des déformations globales et locales du tissu.

Le développement de ce thème relatif aux propriétés et mise en forme des tissus 3D interlocks chaines a été valorisé scientifiquement par :

- 7 publications [34][41][57][58][62][66][97],
- 14 communications [1][2][28][31][36][39][40][54][56][60][61][63][64][65],
- 5 thèses soutenues [4][5][6][7][8],
- 2 masters recherches soutenus [3][29],
- 1 thèse de doctorat en cours [95]

## VI. Bibliographie

- [1] F. Boussu and X. Legrand, "Technical and Economical performances of 3D Warp Interlock Structures," in *SAMPE 08*, vol. 53, Long Beach, CA, USA, May 18-22, 2008.
- [2] F. Boussu, I. Cristian, and X. Legrand, "General specification of warp interlock structure: application for carbon fiber multi-layer fabrics," in *Avantex technitextil symposium*, Frankfurt, Germany, from 16/06/2009 to 17/06/2009.
- [3] S. Nauman, "Modélisation Géométrique de tissu 3D Interlock," Laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, Master report 2008.
- [4] S. Nauman, "Geometrical modelling and characterization of 3D warp interlock composites and their on-line structural health monitoring using flexible textile sensors," University of Lille 1, Lille, Ph-D thesis 24/03/2011.
- [5] P. Lapeyronnie, "Mise en œuvre et comportement mécanique de composites organiques renforcés de structures 3D interlocks," Université de Lille 1, Douai, France, Thèse de doctorat 14/12/2010.
- [6] C. Ha-Minh, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 17/11/2011.
- [7] M. Lefebvre, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 07/12/2011.
- [8] B. Provost, "Étude et Réalisation d'une solution à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 14/01/2013.
- [9] H.L. Yi and X. Ding, "Conventional Approach on Manufacturing 3D Woven Preforms Used for Composites," *Journal of Industrial Textiles*, pp. 34-39, 2004.
- [10] S.Z. Sheng and S.V. Hoa, "Modelling of 3D Angle Interlock Woven Fabric Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 16, no. 1, pp. 45-59, 2003.
- [11] J. Hu, *3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structure.*: Woodhead publishing,



2008, vol. 74.

- [12] L Tong, AP Mouritz, and MK Bannister, *3D Fibre Reinforced Composite Materials*. London: Elsevier Applied Science, 2002.
- [13] F. Ko, "3-D textile reinforcements in composite materials," in *3-D Textile Reinforcements In Composite Materials*.: Woodhead Publishing Limited, 2007.
- [14] A.P. Mouritz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, and K.H. Leong, "Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, pp. 1445-1461, 1999.
- [15] M. Ansar, W. Xinwei, and Z. Chouwei, "Modeling strategies of 3D woven composites: A review," *Composite structures*, vol. 93, no. 8, pp. 1947 - 1963, 2011.
- [16] L. Bateup et al., "HYBRIDMAT 4 : Advances in the manufacture of 3-D preform reinforcement for advanced structural composites in aerospace - a mission to the USA," DTI (Department of Trade and Industry) and NCN (National Composites Network), Global watch mission report 2006.
- [17] C. Zhang, "Characterization and modeling of 3D woven composites," North Carolina State University, Ph.D. thesis 2003.
- [18] B.K. Behera and R. Mishra, "3-Dimensional Weaving," *Indian Journal of Fiber and Textile Research*, vol. 33, pp. 274-287, 2008.
- [19] N.K. Naik, S.N.M. Azad, and P.D. Prasad, "Stress and Failure Analysis of 3D Angle Interlock Woven Composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 36, pp. 93-123, January 2002.
- [20] W. Hufenbach, R. Böhm, M. Thieme, and A. Winkler, "Polypropylene/glass fibre 3D-textile reinforced composites for automotive applications," *Materials and Design*, vol. 32, pp. 1468-1476, 2011.
- [21] C. El Hage, "Modélisation et comportement élastique endommageable de matériaux composites à renforts tridimensionnels," Université Technologique de Compiègne, Compiègne, thèse de doctorat Octobre 2006.
- [22] J. Brandt, K. Drechsler, and FJ. Arendts, "Mechanical Performance of composites based on various three dimensional woven fibre preforms," *Composites sciences and technology*, vol. 56, pp. 381-386, 1996.
- [23] S. Lomov et al., "A comparative study of tensile properties of non crimp 3D orthogonal weave and multi layer plain weave e-glass composites. Part1: Materials, Methods and Principal Results," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 8, pp. 1134-1143, August 2009, Special Issue: 15th French National Conference on Composites - JNC15.
- [24] B.J. Hill, R. McIlhagger, and C.M. Harper, "The effect of Internal Structural Changes on the Properties of Multi-Layer Fabrics for Composite Reinforcement," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 3, no. 2, pp. 105-115, 1995.
- [25] W.S. Kuo, J. Fang, and H.W. Lin, "Failure behavior of 3D woven composites under transverse shear," *Composites Part A*, vol. 34, pp. 561-575, 2003.
- [26] W.S. Kuo, T.H. Ko, and C.P Chen, "Effect of weaving processes on compressive behaviour of 3D woven composites," *Composites Part A*, 2006.
- [27] B.N. Cox and M.S. Dadkhah, "The macroscopic elasticity of 3D woven composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, pp. 785-819, 1995.
- [28] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, D. Soulat, and X. Legrand, "Analyse du comportement de renforts tissés interlock lors du procédé de préformage," in *21ème Congrès Français de Mécanique*, Bordeaux, France, du 26 au 30 août 2013.
- [29] N. Nawab, "Etude de moulabilité des tissus 3D multi-couches interlocks," ESNAIT laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, Master MPT ENSAIT 2009.
- [30] X. Ding and H.L. Yi, "Parametric Representation of 3D Woven Structure," in *6th Asian Textile Conference (CD Version)*, Hong Kong, China, 2001.
- [31] F. Boussu, I. Cristian, and S. Nauman, "Technical performance of yarns inside a 3D woven fabric," in *ITC International Conference on Latest Advancements in High Tech Textiles and Textile-based Materials*, Gent, Belgium, 23-25 September 2009, pp. 142-149.
- [32] B. Lee, K.H. Leong, and I. Herszberg, "The effect of weaving on the tensile properties of carbon fibre tows and woven composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 20, pp. 652-670, 2001.
- [33] L. Lee, S. Rudov-Clark, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, and I. Herszberg, "Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites," *Composite Structures*, vol. 57, pp. 405-413, 2002.
- [34] I. Cristian, S. Nauman, F. Boussu, and V. Koncar, "A study of strength transfer from tow to textile composite using different reinforcement architectures," *Applied Composite Materials*, vol. 19, no. 3-4, pp. 427-442, 2012.
- [35] S. Rudov-Clark, A.P. Mouritz, L. Lee, and M.K. Bannister, "Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites," *Composites Part A*, vol. 34, pp. 963-970, 2003.
- [36] F. Boussu, I. Cristian, S. Nauman, P. Lapeyronnie, and C. Binetruy, "Effect of 3D-weave architecture on strength transfer from tow to textile composite," in *2nd World conference on 3D Fabrics and their applications*, Greenville, South Carolina, USA, 6-7 avril 2009.
- [37] P.J. Callus, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, and K.H. Leong, "Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites," *Composites Part A*, vol. 30, pp. 1277-1287, 1999.
- [38] BN Cox, MS Dadkhah, and WL Morris, "On the tensile failure of 3D woven composites," *Composite part A Applied Sciences Manufacturing*, vol. 27, pp. 447-458, 1996.
- [39] I. Cristian, F. Boussu, and S. Nauman, "Interesting parameters of 3D warp interlock fabrics influencing the mechanical properties of the final composite structures," in *10th World Textile Conference*, Vilnius, Lithuania, 21-23 June, 2010.
- [40] S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, and V. Koncar, "Impact of 3D woven structure onto the high performance yarn properties," in *Second Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation, Textile Composites Workshop*, Casablanca, Morocco, November 2009 the 12 - 14th.
- [41] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, and F. Boussu, "Angle-interlock reinforcements: Weaving and the mechanical properties of composites," *JEC Composites*, no. 58, pp. 58-59, 2010.
- [42] P. Tan, L. Tong, and G.P. Steven, "Micromechanics models for mechanical and thermomechanical properties of 3D through-the-thickness angle interlock woven composites," *Composites Part A*, vol. 30, pp. 637-648, 1999.
- [43] W. Hufenbach et al., "Delamination behaviour of 3D Textile reinforced composites – experimental and numerical approaches," in *CDCM 2006 - Conference on Damage in Composite Materials 2006*, Stuttgart, Germany, 18th-19th of September 2006.

- [44] K.H. Tsai, C.H. Chiu, and T.H. Wu, "Fatigue Behaviour of 3D Multi-Layer Angle Interlock Woven Composite Plates," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 241-248, 2000.
- [45] J. N. Baucom and M.A. Zikry, "Evolution of Failure Mechanisms in 2D and 3D Woven Composite Systems Under Quasi-Static Perforation," *Journal of Composite Materials*, vol. 37, no. 18, pp. 1651-1674, 01/01 2003.
- [46] Y. Tanzawa, N. Watanabe, and T. Ishikawa, "« Interlaminar fracture toughness of 3-D orthogonal interlocked fabric composites," *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 8, pp. 1261-1270, juin 1999.
- [47] F. Chen and J.M. Hodgkinson, "Impact behaviour of composites with different fibre architecture," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 223, no. 7, pp. 1009-1017, 01/11 2009.
- [48] NK Naik, SK Azad, N.M Durga Prasad, and P Thur, "Stress and Failure Analysis of 3D Orthogonal Interlock Woven Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 20, no. 17, pp. 1485-1523, 2001.
- [49] N.V. Padaki, R. Alagirusamy, B.L. Deopura, and R. Figueiro, "Influence of Preform Interlacement on the Low Velocity Impact Behavior of Multilayer Textile Composites," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 40, no. 2, pp. 171-185, 26/05 2010.
- [50] P.S. Tung and S. Jayaraman, "Three Dimensional Multilayer Woven Preforms for Composites," in *High-Tech Fibrous Materials*. Washington, DC., USA: ACS Publisher, 1991, pp. 53-80.
- [51] F. Coman, L. Herszberg, and M. Bannister, "Design and analysis of 3d woven preforms for composite structures," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 83-96, 1996.
- [52] Y.M. Tarnopol'skii, V.L. Kulakov, and A.K. Aranautov, "Measurements of shear characteristics of textile composites," *Computers & Structures*, vol. 76, no. 1-3, pp. 115-123, 2000.
- [53] M.A. McGlockton, B.N. Cox, and R.M. McMeeking, "A binary model of textile composites : III High failure strain and work of fracture in 3D weaves," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 51, pp. 1573-1600, 2003.
- [54] S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, and V. Koncar, "Design and Optimization of piezoresistive sensors for Structural health monitoring of carbon fiber reinforced 3D woven composites," in *7th International Bhurban conference on applied sciences and technology*, Islamabad, Pakistan, 11-14 January 2010.
- [55] AFNOR, "Composites plastiques renforcés de fibres - Détermination des propriétés de flexion," Norme NF EN ISO 14125 Juin 1998.
- [56] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "In situ strain sensing in Three dimensional woven preform based composites using flexible tensile sensor," in *10th TEXCOMP International Conference on Textile Composites*, Lille, France, October 26-28, 2010, pp. 363-370.
- [57] S. Nauman, P. Lapeyronnie, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "On line measurement of structural deformations in composites," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1329 - 1336, June 2011.
- [58] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "Piezoresistive fibrous sensor for on line structural health monitoring of composites," in *Smart Sensors for Industrial applications*, CRC Press, Ed., 2013, vol. Part V Piezoresistive, wireless and electrical sensors, ch. 27, pp. 455-469.
- [59] X. Chen, W.Y. Lo, A.E. Tayyar, and R.J. Day, "Mouldability of Angle-Interlock Woven Fabrics for Technical Applications," *Textile Research Journal*, vol. 72, no. 3, pp. 195-200, March 2002.
- [60] F. Boussu, X. Legrand, S. Nauman, and C. Binetruy, "Mouldability of angle interlock fabric," in *FCPM 9, 9th international Conference on Flow Processes in Composite Materials*, Montréal, Canada, 8-10 July 2008, p. 42.
- [61] X. Legrand et al., "Forming behaviour of warp interlock composite," in *ESAFORM Conference*, Twente University, Netherlands, 27 to 29th April 2009.
- [62] X. Legrand et al., "Forming Behaviour of Warp Interlock Composite," *International Journal of Material Forming*, vol. 2, no. 1, pp. 177-180, August 2009.
- [63] Y. Nawab, S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, and V. Koncar, "Study of Mouldability of 3D Woven Multilayer Interlock reinforced Carbon-Epoxy Composites," in *7th International Bhurban conference on applied sciences and technology*, Islamabad, Pakistan, 11-14 January 2010.
- [64] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, and D. Soulat, "Stamping behaviour of 3D warp interlock fabrics," in *13th AUTEX World Textile Conference*, Dresden, Germany, May 22nd to 24th 2013.
- [65] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, and D. Soulat, "Experimental Analysis of the warp interlock deformability during the stamping process," in *TEXCOMP 11 Conference*, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [66] C. Dufour, P. Wang, F. Boussu, and D. Soulat, "Experimental investigation about stamping behaviour of 3D warp interlock composite preforms," *Applied Composite Material*, 2013.
- [67] W. Najjar, X. Legrand, P. Dalsanto, D. Soulat, and S. Boude, "Analysis of the blank holder force effect on the preforming process using a simple discrete approach," *Key Engineering Materials*, vol. 554-557, pp. 441-446, 2013.
- [68] H. Lin, J. Wang, A.C. Long, M.J. Clifford, and P. Harrison, "Predictive modelling for optimization of textile composite forming," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 15, pp. 3242 -3252, 2007, DOI 10.1016/j.compscitech.2007.03.040.
- [69] P. Molnar, A. Ogale, R. Lahr, and P. Mitschang, "Influence of drapability by using stitching technology to reduce fabric deformation and shear during thermoforming," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 15, pp. 3386 - 3393, 2007, DOI 10.1016/j.compscitech.2007.03.22.
- [70] AA Skordos, CM Aceves, and MPF Sutcliffe, "A simplified rate dependent model of forming and wrinkling of pre-impregnated woven composites," *Composite Part A*, vol. 38, pp. 1318-1330, 2007.
- [71] J.C. Gelin, A. Cherouat, P. Boisse, and H Sabhi, "Manufacture of thin composite structures by the RTM process : Numerical simulation of the shaping operation," *Composites Science and Technology*, vol. 56, no. 7, pp. 711-718, 1996, DOI 10.1016/0266
- [72] Ji S. Lee, J. Hong Seok, Woong-Ryeol Yu, and J. Kang Tae, "The effect of blank holder force on the stamp forming behavior of non-crimp fabric with a chain stitch," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 3, pp. 357 - 366, 2007, DOI 10.1016/j.compscitech.2006.09.009.
- [73] U Mohammed, C Lekakou, and M.G. Bader, "Experimental studies and analysis of the draping of woven fabrics," *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 12, pp. 1409-1420, 2000, DOI 10.1016/S1359 -835X(00)00080-4.
- [74] J. Hofstee, H. De Boer, and F. Van Keulen, "Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain weave fabric composite, Part I,"

*Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 7, pp. 1041-1053, 2000.

- [75] R.S. Feltman and M.H. Santare, "Evolution of fiber waviness during the forming of aligned fiber/thermoplastic composite," *Composites manufacturing*, vol. 5, no. 4, pp. 203-215, 1994.
- [76] Uday Vaidya, *Composites for Automotive, truck and mass transit - Materials, Design, Manufacturing*.: Destech publications book, 2011, Chapter 1. Introduction.
- [77] K. Vanclooster, S.V. Lomov, and I. Verpoest, "Experimental validation of forming simulations of fabric reinforced polymers using an unsymmetrical mould configuration," *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* , vol. 40, no. 4, pp. 530 - 539, 2009, DOI 10.1016/j.compositesa.2009.02.005.
- [78] P. Ouagne, D. Soulat, J. Moothoo, E. Capelle, and S. Gueret, "Complex shape forming of a flax woven fabric; analysis of the tow buckling and misalignment defect," *Composites Part A*, vol. 51, pp. 1–10, August 2013.
- [79] N. Hamila and P. Boisse, "Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element," *Composites: Part B*, vol. 39, pp. 999–1010, 2008.
- [80] T. Gereke, O. Döbrich, M. Hübner, and C. Cherif, "Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 46, pp. 1–10, March 2013.
- [81] MA. Khan, T. Mabrouki, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse, "Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming a hypoelastic behaviour. application to the double dome benchmark," *Journal of Material, Process and Technology*, vol. 2, pp. 378 - 388, 2010.
- [82] X. Peng and ZU. Rehman, "Textile composite double dome stamping simulation using a non-orthogonal constitutive model," *Composite Science and Technology*, vol. 71, pp. 1075–1081, 2011.
- [83] X. Peng and F. Ding, "Validation of a non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics via hemispherical stamping simulation," *Composites: Part A*, vol. 42, pp. 400–407, 2011.
- [84] A. Charmetant, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse, "Hyperelastic modelling for mesoscopic analyses of composite reinforcements," *Composite Science and Technology*, vol. 71, pp. 1623–1631, 2011.
- [85] S. Allaoui et al., "Experimental and numerical analyses of textile reinforcement forming of a tetrahedral shape," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 6, pp. 612-622, June 2011.
- [86] S. Allaoui et al., "Experimental preforming of highly double curved shapes with a case corner using an interlock reinforcement," *International Journal of Material Forming*, vol. 7, no. 2, pp. 155-165, June 2014.
- [87] E. Capelle, P. Ouagne, D. Soulat, and D. Duriatti, "Complex shape forming of flax woven fabrics: Design of specific blank-holder shapes to prevent defects," *Composites Part B: Engineering*, vol. 62, pp. 29-36, June 2014.
- [88] E. De Luycker, F. Morestin, P. Boisse, and D. Marsal, "De Luycker E, Morestin F, Boisse P, Marsal D. Simulation of 3D interlock composite preforming," *Composite Structure*, vol. 88, pp. 615–623, 2009.
- [89] E. De Luycker, F. Morestin, P. Boisse, and D. Marsal, "Numerical analysis of 3D interlock composite preforming," *International Journal of Material Forming*, vol. 1, pp. 843–846, 2008.
- [90] J.G. Orliac, A. Charmetant, F. Morestin, P. Boisse, and S. Otin, "3D interlock composite preforming simulation," *Key Engineering Materials*, vol. 504-506, pp. 261-266, 2012.
- [91] E. De Luycker, "Simulation et experimentation en mise en forme de renforts composites 3D Interlocks," INSA, Lyon, France, Thèse de Doctorat 2009.
- [92] J.G. Orliac, "Analyse et simulation du comportement anisotrope lors de la mise en forme de renforts tissés interlock," INSA, Lyon, France, Thèse de Doctorat 2012.
- [93] P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé, and F. Dumont, "Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses," *Composite Science Technology*, vol. 71, no. 5, pp. 683-692, 2011.
- [94] AG Prodromou and J Chen, "On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms," *Composite Part A*, vol. 28, pp. 491–503, 1997.
- [95] C. Dufour, "Conception et optimisation des structures tissées interlocks pour optimisation de la mise en forme 3D des renforts fibreux de matériau composite," Université de Lille 1, Villeneuve d'ascq, France, Thèse de doctorat début de la thèse 01/09/2012.
- [96] S. Bel, N. Hamila, P. Boisse, and F. Dumont, "Finite element model for NCF composite reinforcement preforming: Importance of inter-ply sliding," *Composites Part A*, vol. 43, pp. 2269 - 2277, 2012.
- [97] F. Boussu, "The use of warp interlock fabric inside textile composite protection against ballistic impact," *Textile Research Journal*, vol. 81, no. 4, pp. 344-354, March 2011, DOI: 10.1177/0040517510385170.

## Thème 3. Analyse et optimisation du procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines

Le troisième thème se focalise sur l'analyse du procédé de fabrication des tissus permettant d'en révéler son caractère complexe, nécessitant quelques adaptations. L'observation visuelle par images issues de vidéos rapides de la cinématique du procédé de tissage et la mesure des contraintes appliquées sur la matière par l'utilisation de fils capteurs innovants aboutissent à une meilleure compréhension de la fabrication des tissus. La cinématique du procédé de tissage a été reproduite par simulation, permettant d'analyser les différents mouvements dynamiques des éléments de la machine à tisser qui influent sur la géométrie finale de l'architecture tissée. L'observation des sections transverses des fils de chaîne et trame, ainsi que leur positionnement dans le tissu, montrent une forte similarité entre les tissus simulés et les tissus réels. L'optimisation du procédé de fabrication a permis de minimiser la dégradation des fils au cours du tissage. La conception de machines à tisser de prototypage adaptées aux tissus 3D interlocks chaines pour l'ensemble des types de fils (carbones et autres natures) repose sur cette expérience et compréhension du procédé de fabrication et a permis de l'optimiser aux structures tissées multi-couches.

## Sommaire

I.	Introduction .....	63
II.	Observation et analyse du procédé de fabrication .....	63
A.	Observation de la cinématique du procédé de tissage .....	63
B.	Observation de la dynamique du procédé de tissage .....	64
1.	Mesure visuelle de la dynamique du procédé de tissage .....	64
2.	Mesure des sollicitations dynamiques in-situ par fils capteurs proches des lamelles casse-chaines .....	65
3.	Mesure des sollicitations dynamiques in-situ par fils capteurs proches des lisses .....	66
C.	Analyse du procédé de fabrication par simulation .....	66
1.	Modèles utilisés pour le fil et les éléments de la machine à tisser .....	66
2.	Simulation des étapes de la formation d'un tissu .....	67
3.	Simulation de la formation d'un tissu 2D d'armure toile à base de fils de 300 Tex [1] .....	68
4.	Simulation de la formation d'un tissu 2D d'armure croisé 2-2 à base de fils de 300 Tex [1] .....	69
D.	Conclusion sur l'observation et l'analyse du procédé de fabrication .....	70
III.	Optimisation du procédé de tissage adapté aux tissus 3D interlocks chaines .....	71
A.	Optimisation sur une machine à tisser industrielle .....	71
B.	Conception d'une machine à tisser de prototypage optimisée pour les tissus 3D interlocks chaines à base de fils autres que carbone .....	74
C.	Conception d'une machine à tisser de prototypage optimisée pour les tissus 3D interlocks chaines à base de fils carbonés .....	75
D.	Conclusion sur l'optimisation du procédé de fabrication adapté aux tissus 3D interlocks chaines .....	76
IV.	Endommagement matière au cours du tissage 3D interlock chaîne .....	76
A.	Analyse de l'endommagement des fils lors du procédé de tissage .....	77
B.	Analyse de l'endommagement des fils sur machine à tisser industrielle .....	78
C.	Analyse des endommagements des fils sur machine à tisser de prototypage .....	79
1.	Optimisation de la valeur de torsion (tours/m) des fils de para-aramide Kevlar-29 (3300 dTex) .....	79
2.	Mesure de la dégradation des fils lors de la fabrication du tissu 3D interlock chaîne .....	80
D.	Conclusion sur l'étude de l'endommagement matière au cours du tissage 3D interlock chaîne .....	81
V.	Synthèse .....	82
VI.	Bibliographie .....	82

## I. Introduction

L'objectif général de ce thème consiste à mieux comprendre le procédé de fabrication, notamment lors de la formation d'un tissu, afin de pouvoir l'optimiser à la production de tissu 3D interlock chaîne. L'observation de la cinématique réelle d'une machine à tisser de production, couplée à des mesures in-situ et en temps réel sur les fils, nous permet de mesurer l'influence de la dynamique des éléments de la machine à tisser en contact avec la matière. En tenant compte de ces observations, nous pouvons optimiser le procédé de fabrication adapté aux tissus 3D interlocks chaînes. Lors des deux précédents thèmes, nous avons vu la définition et le paramétrage des structures tissées 3D interlock chaîne (thème 1) ainsi que leurs propriétés mécaniques relativement aux préformes 2D ou lors des procédés d'élaboration des pièces composites (thème 2). Ce thème est consacré à leur procédé d'élaboration en vue de sa maîtrise et de son optimisation.

## II. Observation et analyse du procédé de fabrication

Afin de bien comprendre l'influence du procédé de tissage sur les architectures des tissus 2D et 3D interlock chaîne, nous avons décomposé l'ensemble de ces étapes afin de les simuler dynamiquement pour en reproduire les effets sur la structure tissée [1]. Par la suite, nous aborderons cette étape de modélisation et simulation du procédé de tissage; dont nous rappelons les principales étapes essentielles et nécessaires à la formation d'un tissu 2D.

### A. Observation de la cinématique du procédé de tissage

Les différents types de tissu sont formés [2][3] dans une zone située entre un ensemble de fils de chaîne, disposés parallèlement entre eux sur une ensouple avec une tension constante, et un rouleau d'appel entraînant le tissu (Figure 63 - gauche). Trois opérations principales sont réalisées dans cette zone : une sélection des fils de chaîne (warp yarns) par les lisses (heddles), une insertion du fil de trame (weft yarns) et un tassage du fil de trame au point de façure du tissu par le peigne (reed) de la machine à tisser (Figure 63 - droite). Des templets (temple/stretchers), positionnés sur les bords du tissu, assurent le maintien rectiligne des fils de chaîne dans le tissu.

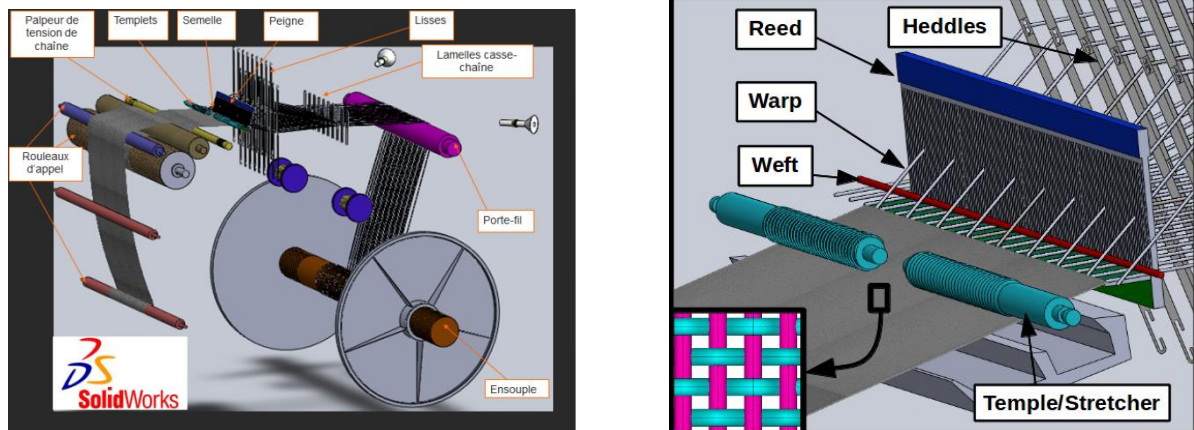


Figure 63. (gauche) représentation schématique globale de la fabrication d'un tissu - (droite) description précise des éléments de la machine à tisser en contact avec les fils de chaîne et trame lors de la formation du tissu.

Au cours de ces trois étapes de la formation du tissu, différents types de contacts et forces s'exercent sur les fils de chaîne et trame, et conduisent à leur dégradation ainsi qu'à la modification de la géométrie initiale de la structure tissée [4][5].

La dynamique de sélection des fils de chaîne par les lisses, afin de former la foule (shed) correspondant à l'angle séparant les deux nappes distinctes (supérieures et inférieures) de fils de chaîne, entraîne des concentrations de contraintes localisées à la surface de contact, de l'ordre de  $1 \text{ à } 2 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ , entre les fils de chaîne et les lisses pouvant dégrader par cisaillement transverse la surface extérieure de la section du fil et favoriser la transmission d'ondes le long des fils de chaîne perturbant leur mise en tension initiale sur l'ensouple (Figure 64 - gauche). Lors de l'insertion dynamique du fil de trame au travers de l'espace créé par la foule et par l'intermédiaire d'un vecteur propre à la machine à tisser, tels que : navette, projectile ou lance(s); des contacts par frottement entre le vecteur et les fils de chaîne, dépendant de la vitesse d'insertion, peuvent provoquer des zones d'usure et de dégradation de la surface extérieure de la section des fils de chaîne ainsi que des effets "coup de fouet" sur le fil de trame inséré, résultant d'un pic de tension exercé sur une échelle de temps très courte, dépendant de la vitesse d'insertion allant de 2 m/s (100 coups/min pour une laize 120cm) à 66 m/s (3300 coups/min pour une laize de 120cm) (Figure 64 - milieu). La dynamique de tassage du fil de trame par le mouvement alternatif du peigne de la machine à tisser au point de formation ou façure du tissu sur les fils de chaîne apparaît comme étant l'étape la plus intense en terme de contraintes localisées conduisant à des frottements dans le sens des fils de chaîne provoqués par les dents du peigne de la machine à tisser et des concentrations d'effort sur la section transverse du fil de trame inséré et positionné entre les différents fils de chaîne (Figure 64 - droite).



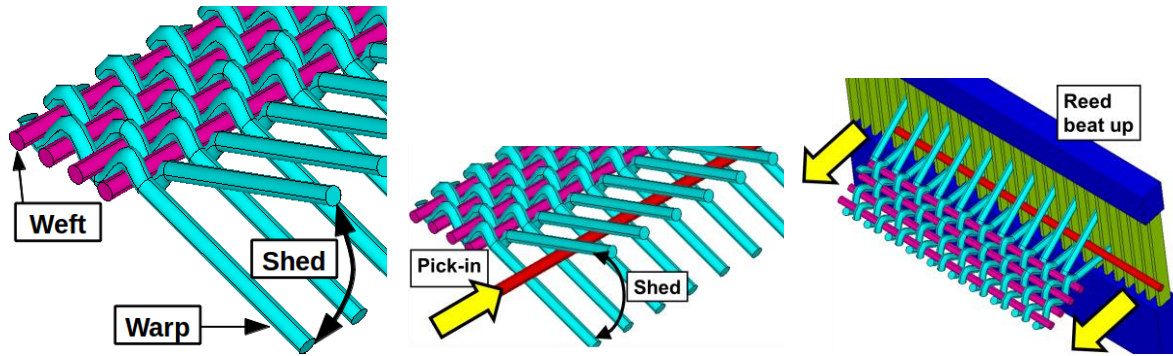


Figure 64. (gauche) Ouverture de la foule (shed) - (milieu) Insertion (pick in) du fil de trame - (droite) Tassement de la duite sur le point de façure par le peigne de la machine à tisser (reed beat up).

Dans les précédentes études de Chepelyuk et al. [6] et Choogin et al. [7], une représentation en coupe des fils de trame de la zone de formation du tissu lors du tassement du peigne sur des fils de chaîne et trame en coton a permis de montrer l'augmentation de la densité en fils de trame due à la pression plus importante exercée par le peigne sur le point de formation du tissu. Ainsi, la dynamique de pression du peigne lors du tassage du fil de trame de lin au point de formation du tissu et la relaxation du fil inséré dans le tissu lors du retrait de la pression du peigne permet de décrire précisément le phénomène dynamique du pic de compression exercée par le peigne au point de formation du tissu et son effet résiduel sur la déformation géométrique locale des fils de chaîne et trame aux points d'entrecroisement.

Dans le cadre des travaux de recherche de Vilfayeu [8] et Trifigny [9], nous avons privilégié l'observation de la cinématique du procédé de tissage à vitesse réelle de production de telle sorte à prendre en compte également l'inertie dynamique des matériaux des éléments de la machine à tisser et leur influence sur les fils en termes de sollicitations mécaniques longitudinales et transverses.

## B. Observation de la dynamique du procédé de tissage

Deux étapes de mesure dynamique ont été envisagées; l'une visuelle, et non invasive, d'observations par caméra rapide des éléments en contact avec les fils au cours du procédé de tissage et l'autre, par détection des sollicitations mécaniques de fils capteurs situés in-situ de la nappe des fils de chaîne et du tissu.

### 1. Mesure visuelle de la dynamique du procédé de tissage

Les vidéos ont été réalisées à l'aide d'une caméra rapide Photron® APX, ayant une résolution maximale de 1024 x 1024 pixels à 2000 images/s, positionnées à différents endroits de la machine à tisser industrielle avec une vitesse de production de 350 coups/min en laize 140cm. Les points de repère, fixés sur le tissu puis sur une lisse associée à un cadre de la machine à tisser, permettent de suivre leurs mouvements selon les axes X et Y au cours de plusieurs cycles d'insertion et de tassage des fils de trame dans le tissu (Figure 65).



Figure 65. (gauche) Positionnement d'un point de repère sur le tissu - (droite) positionnement d'un point de repère sur une lisse.

L'analyse d'images du point de repère situé sur le tissu a permis de révéler une zone d'influence du peigne lors du tassage qui s'étend sur environ quatre fils de trames insérés dans le tissu. L'analyse d'images du point de repère, situé sur la lisse associée à un cadre en mouvement de translation verticale par rapport à la nappe des fils de chaîne, a révélé des mouvements de vibration dans le sens du fil de chaîne provoquant ainsi un léger mouvement de friction dynamique couplé à une sollicitation dynamique par à-coup en cisaillement transverse du fil de chaîne associé à la lisse. Ainsi les courbes du suivi de déplacement des points de repère selon les axe X (en rouge) et Y (en bleu), représentées en Figure 66, permettent de déceler et de comprendre les différents mouvements dynamiques des éléments de la machine à tisser qui peuvent engendrer des contraintes et des déformations sur le fil ou le tissu au cours du procédé de tissage. Concernant le point de repère situé sur le tissu, la

courbe du déplacement selon l'axe X révèle un "pic" se répétant régulièrement et correspondant au "coup de peigne" lors du tassage en foule ouverte des fils de trame au point de formation du tissu (Figure 66 - gauche). La décroissance du mouvement du point de repère fixé sur le tissu selon l'axe Y montre un amortissement progressif du "coup de peigne" dans le tissu qui tend à se stabiliser au bout de 4 fils de trame insérés.

Concernant le point de repère situé sur la lisse associée au mouvement vertical et alternatif d'un cadre de la machine à tisser au cours de plusieurs cycles d'ouverture et de fermeture dynamique de foule, sa courbe de déplacement selon l'axe X restitue les oscillations du fil de chaîne en contact avec la lisse et confirme sa dégradation par mouvement alternatif de frottement dynamique (Figure 66 - droite). La courbe de déplacement du point de repère de la lisse selon l'axe Y, comprenant une partie inférieure extrapolée numériquement, car hors du cadre d'acquisition de la caméra rapide lors du mouvement verticale de la lisse, montre néanmoins la sollicitation dynamique périodique du fil de chaîne lors du mouvement de levée et de baissée de la lisse lors de plusieurs cycles d'ouverture de foule.

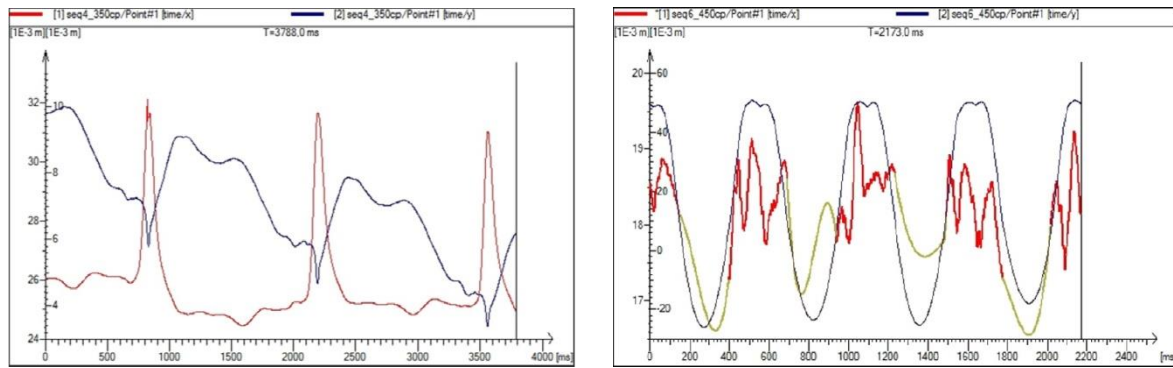


Figure 66. Courbes des déplacements en X et en Y en fonction du temps du point de repère fixé (gauche) sur le tissu - (droite) sur la lisse.

En complément de ces informations visuelles, nous avons pu mesurer directement les sollicitations mécaniques du fil de chaîne par le biais de fil capteur, dont l'enduction innovante [10] [11] et son système de mesure associé, ont permis l'acquisition dynamique des valeurs en temps réel.

## 2. Mesure des sollicitations dynamiques in-situ par fils capteurs proches des lamelles casse-chaines

Lors de travaux de recherche de Trifigny [9], nous avons utilisé un fil capteur, de première génération [12], à la place d'un fil de chaîne, placé juste avant les casses chaînes au moment de la mesure, sur la machine à tisser industrielle pour mesurer les sollicitations dynamiques sur fil lors du tissage des fils de verre E à 100 coups/min pour une laize de 140cm. Le signal recueilli (en rouge) est initialement très bruité, en raison d'une valeur initiale de résistance élevée; mais suite à l'application d'un filtre numérique passe bas, un signal régulier (en vert) est obtenu (Figure 67). On peut remarquer une certaine périodicité dans le signal du capteur, correspondant à une période de tissage de 1200 ms du motif élémentaire sur la machine à tisser [13][14][15].

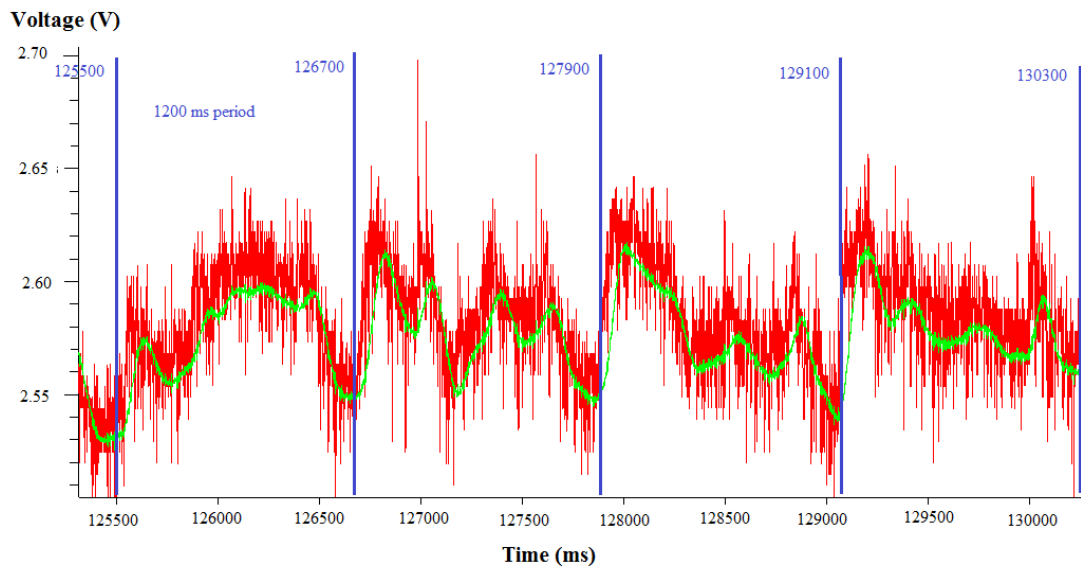


Figure 67. Mesure des sollicitations mécaniques par un capteur fil, situé proche des lamelles casse chaînes, avec un signal brut (rouge) et filtré (vert) lors du tissage sur machine à tisser industrielle.

### 3. Mesure des sollicitations dynamiques in-situ par fils capteurs proches des lisses

Toujours dans le cadre des travaux de recherche de Trifigny [9], nous avons utilisé un fil capteur de deuxième génération [16][17], à la place d'un fil de chaîne, placé juste avant et après le passage d'une lisse sur la machine à tisser industrielle pour mesurer les sollicitations dynamiques sur fil de verre E, à une vitesse de production de 100 coups/min et pour une laize de 140 cm. Nous pouvons constater (Figure 68) une périodicité de 2,4s du signal en forme de "dent de scie" correspondant au mouvement alternatif vertical imposé par la lisse sur le fil de chaîne lors de chaque formation de la foule. La décroissance progressive du signal lors des 4 premiers cycles semble indiquer une faible diminution de la tension du fil de chaîne correspondant à une sélection de cadre identique en position levée respectant ainsi la programmation imposée par la carte de perçage du motif tissé, puis une augmentation du cinquième cycle du signal du fil capteur est observée reflétant une légère augmentation de la tension du fil capteur due au changement de position baissée du cadre commandé par la machine à tisser industrielle.

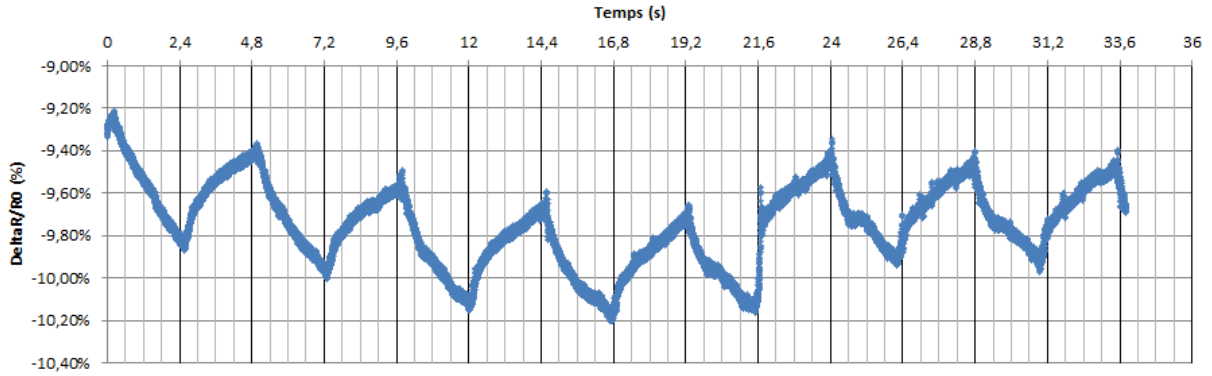


Figure 68. Mesure des sollicitations mécaniques par un capteur fil situé dans une lisse en mouvement dynamique verticale avec une fréquence d'acquisition de 1000 Hz.

Sur la base de ces mesures in-situ réalisées par le biais de fils capteurs et selon l'observation de la cinématique des principaux éléments de la machine à tisser pour en comprendre les effets dynamiques sur les fils de chaîne lors de la fabrication du tissu, nous pouvons reproduire la cinématique de la formation du tissu et analyser par simulation les paramètres du procédé de fabrication qui influent sur la géométrie de la structure tissée.

### C. Analyse du procédé de fabrication par simulation

Sur la base des observations précédentes, nous avons reproduit les différents mouvements des fils de chaîne et trame lors de la formation du tissu, puis nous avons reproduit par simulation la fabrication de tissus 2D, à base de fils de chaîne et trame de type verre E de titrage 300 Tex, en considérant deux armures : toile et croisé 2-2.

#### 1. Modèles utilisés pour le fil et les éléments de la machine à tisser

Selon les observations effectuées lors des travaux de recherche de Vilfayeu [8], nous avons choisi un modèle circulaire pour la section du fil telle qu'observée sur la machine à tisser jusqu'au point de formation du tissu, avec un diamètre moyen de 0,6 mm pour le fil de verre E de titrage 300 Tex. Sur la base des travaux de recherche récents [18][19][20][21][22], nous avons choisi une loi de comportement du fil de type isotrope transverse (Figure 69).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Figure 69. Repère orthonormé associé au fil et la loi de comportement isotrope transverse associée [18][19][20][21][22].

Étant donné que le fil est considéré comme isotrope transverse [18][19][20][21][22], on obtient par simplification :  $E_{22} = E_{33}, \nu_{12} = \nu_{13}, G_{12} \approx G_{13}$

Les valeurs des modules de Young, des modules de cisaillement et des coefficients de Poisson pour un fil de verre E de 300 Tex ( $\rho = 2,6 \text{ g/cm}^3$ ) ont été sélectionnées initialement dans des travaux de recherche [23][24] et ajustées pour compenser les écarts entre le comportement simulé et réel du fil (Tableau 16).

Tableau 16. Valeurs des modules de Young (GPa), de cisaillement (GPa) et coefficients de Poisson pour le fil de verre E.

$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
52,5	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	0,2	0,2	0,25	0	0	0

Des éléments hexaédriques à 8 nœuds ont été choisis pour le maillage des fils; ce qui facilite le suivi des contacts. Un bon compromis entre le temps CPU et une description géométrique représentative de l'écrasement des sections transverses lors de l'entrelacement entre les fils de chaîne et trame a été obtenue en maillant les sections transverses avec 16 éléments. Le peigne a été modélisé par une surface maillée avec 8 éléments quadrilatéraux sur deux rangées avec des propriétés propres aux aciers. Les lisses ne sont pas modélisées en tant qu'éléments mécaniques indépendants, mais se substituent à un déplacement vertical des ensembles de nœuds situés sur les fils de chaîne et imposé par les lisses. L'action de la fausse-lisière qui sert à maintenir le fil de trame quand il est tassé par le peigne, ainsi que les fils de chaîne utilisés en liage de type "pas-de-gaze" qui servent à consolider les bords du tissu, ont été simulés en contraignant les nœuds des extrémités des fils de trame à un mouvement de type glissière, colinéaire au déplacement du peigne. Les contacts entre les fils ont été considérés comme des contacts entre des corps déformables, dont les frottements ont été représentés par une loi de Coulomb avec une valeur de 0,3 et le contact avec le peigne et le fil de trame avec une valeur de 0,1 [25].

Les simulations ont été conduites avec le solveur explicite du logiciel élément fini Radioss [26]. Le traitement de l'ensemble des non-linéarités et du contact apparaît plus simple à gérer, bien que la stabilité des schémas explicites soit conditionnée au pas de temps [27][28] [29].

## 2. Simulation des étapes de la formation d'un tissu

Ainsi, la simulation a consisté à reproduire numériquement les différents mouvements des éléments de la machine à tisser en considérant les différents modèles, loi de comportement et temps de cycle de production reproduisant les données réelles lors du tissage. Au début de la simulation, la mise en place du nombre de couples "fil de trame/peigne" (Figure 70 (a)) nécessaire à la réalisation du motif tissé, a permis à la fois de reproduire le phénomène de compaction du fil de trame au point de formation du tissu et d'éviter de modéliser, puis simuler, le mouvement d'insertion du fil de trame dans la foule; ce qui réduit les temps de calcul et n'intervient pas sur les déformations résiduelles des sections des fils de chaîne et trame.

Les étapes de formation du tissu par simulation numérique des principaux mouvements ont permis de reproduire l'ouverture de la foule qui maintient fermement la dernière trame insérée contre le tissu (Figure 70 (b)), le mouvement horizontal du peigne qui tasse et compacte le fil de trame additionnel contre le point de façure (Figure 70 (c)), et la fermeture de la foule par mouvement inverse des lisses assurant le maintien de la nouvelle trame insérée (Figure 70 (d)).

La simulation du procédé de tissage nous a permis de positionner les fils de chaîne et trame en fonction des valeurs initiales du tissu et reproduire les différents mouvements et temps de cycle en fonction des valeurs réelles de la dynamique du tissage sur machine à tisser industrielle [30][31][32][33][34].

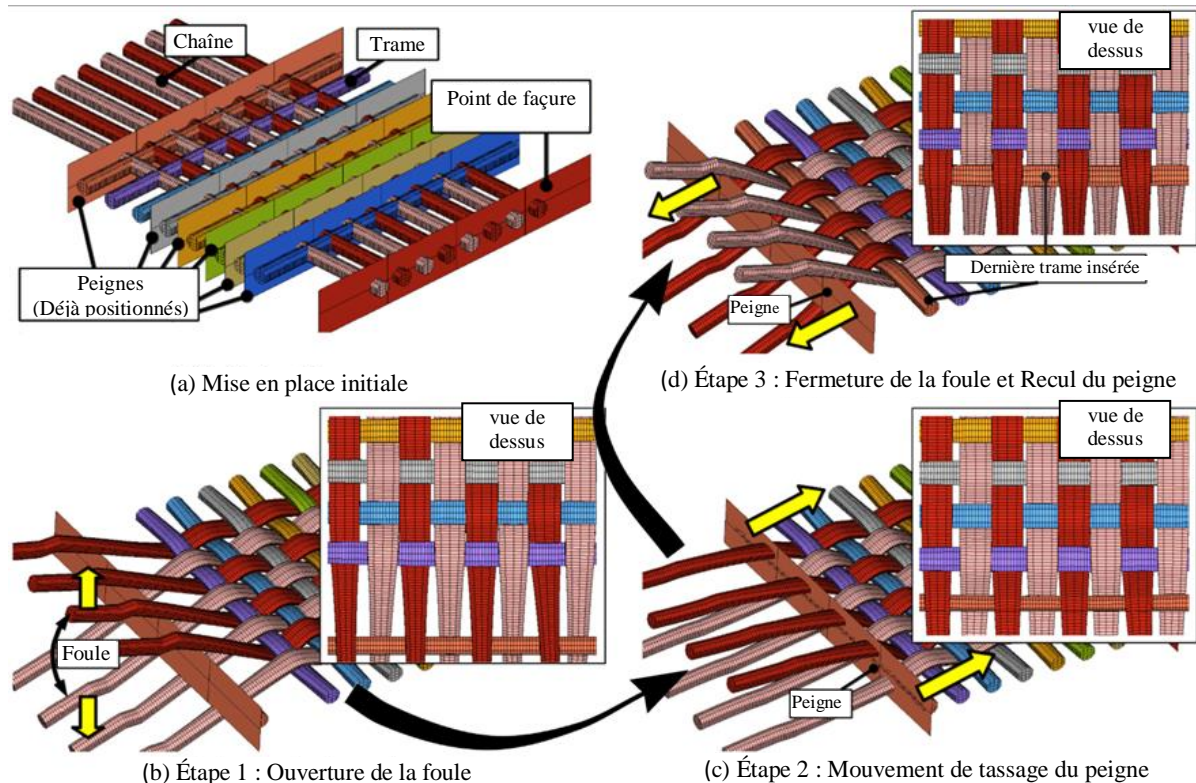


Figure 70. Description des différentes étapes de simulation de la formation du tissu.

Sur la base de cet outil de simulation de la formation du tissu, nous avons simulé la fabrication de tissu à base de fils de verre E et comparé les géométries simulées avec les tissus réels issus de la production sur la même machine à tisser industrielle [35][36][37][38].



### 3. Simulation de la formation d'un tissu 2D d'armure toile à base de fils de 300 Tex [1]

L'observation des géométries simulées et réelles du tissu d'armure toile, sur la base d'un motif élémentaire situé hors zones des lisières et du démarrage du tissu, a été effectuée par différents plans de coupes numériques et physiques des échantillons tissés selon les directions chaîne et trame (Figure 71).

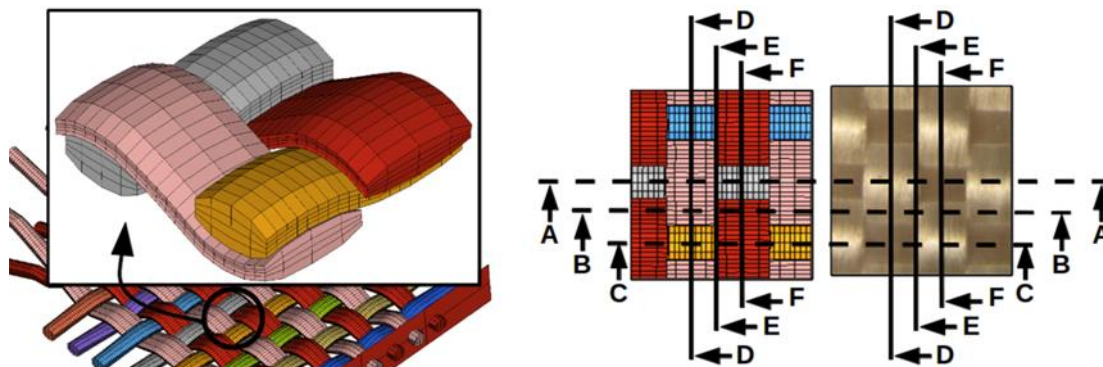


Figure 71. (gauche) représentation du motif élémentaire du tissu d'armure toile - (droite) représentation des directions des plans de coupe du motif tissé réel et simulé.

La comparaison des sections des fils de chaîne du tissu simulé et du tissu réel, moyennant les écarts de mesures sur les échantillons résinés et les hypothèses propres à la modélisation (sections elliptiques tronquées par les arêtes des éléments), selon les différents plans de coupe A-A, B-B et C-C correspondant à différentes positions des fils de trame dans le tissu, semble montrer une similarité de géométrie des deux tissus. Ce qui tend à reproduire les effets dynamiques numériques de la cinématique lors de la formation du tissu sur le changement de géométrie du fil de chaîne; initialement circulaire juste avant le point de formation du tissu et sous forme d'ellipse une fois lié avec les fils de trame (Figure 72). L'erreur relative mesurée pour les sections transverses selon le plus grand axe de la section elliptique ne dépasse pas 6%, respectivement 13% selon le plus petit axe.

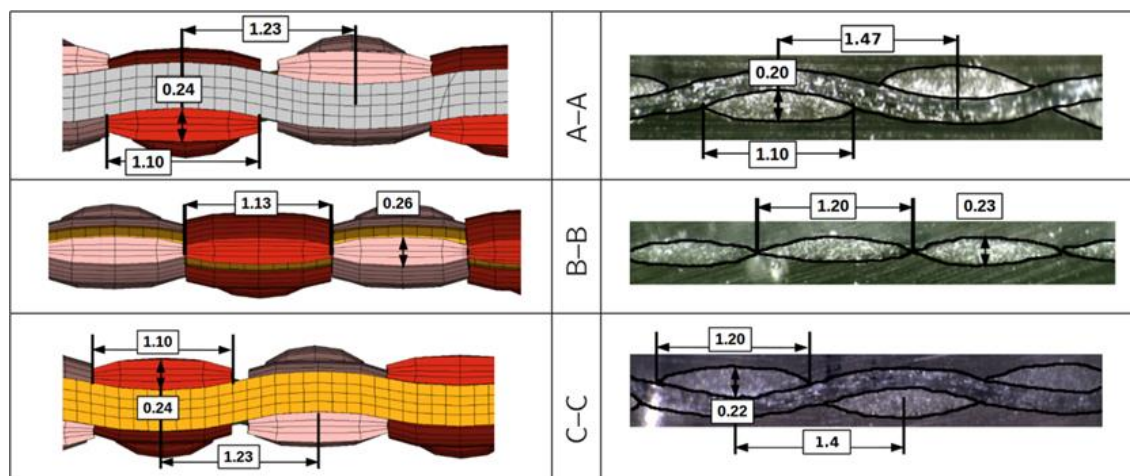


Figure 72. Comparaison des sections simulées (gauche) et réelles (droite) des fils de chaîne du tissu 2D d'armure toile pour les différents plans de coupe A-A, B-B et C-C.

La comparaison des sections des fils de trame du tissu simulé et du tissu réel, effectuée selon les différents plans de coupe D-D, E-E et F-F correspondant à différentes positions des fils de chaîne dans le tissu, semble montrer également une même distribution de la position des fils de trame régulée par les mouvements simulés du peigne, à l'identique de ses mouvements réels (Figure 73). Cependant, la géométrie de la section transverse du fil au sein du tissu simulé semble plus éloignée que celle du fil inséré dans le tissu réel en raison de la non prise en compte de la tension des fils de chaîne dans le modèle numérique, ce qui a pour incidence de réduire l'effet de compaction observée sur la géométrie des sections de fils de trame du tissu réel.



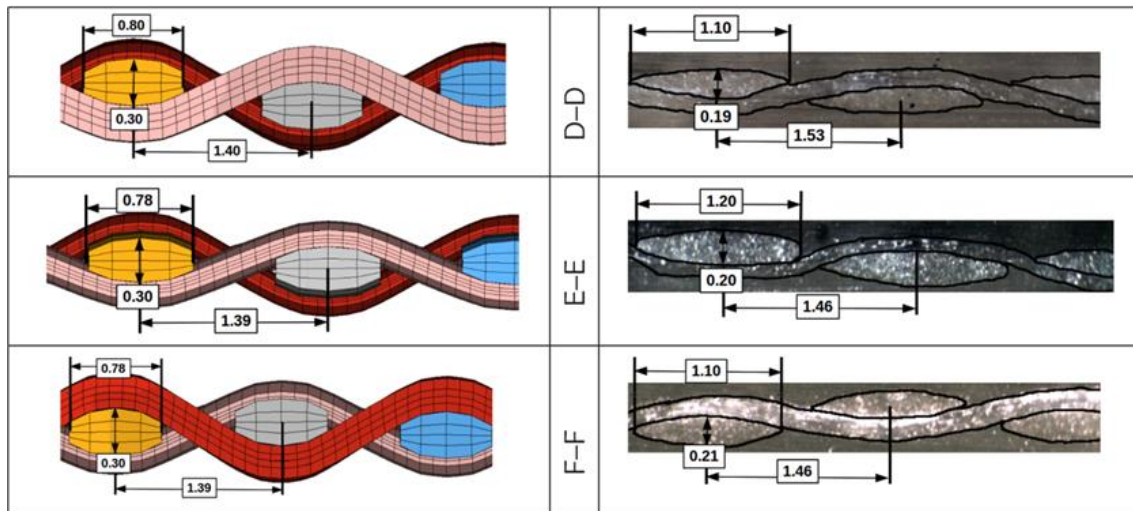


Figure 73. Comparaison des sections simulées (gauche) et réelles (droite) des fils de trame du tissu 2D d'armure toile pour les différents plans de coupe D-D, E-E et F-F.

#### 4. Simulation de la formation d'un tissu 2D d'armure croisé 2-2 à base de fils de 300 Tex [1]

L'observation des géométries simulées et réelles du tissu 2D d'armure croisé 2-2, sur la base d'un motif élémentaire situé hors zones des lisières et du démarrage du tissu, a également été effectuée par plusieurs plans de coupes numériques et physiques des échantillons tissés selon les directions chaîne et trame (Figure 74).

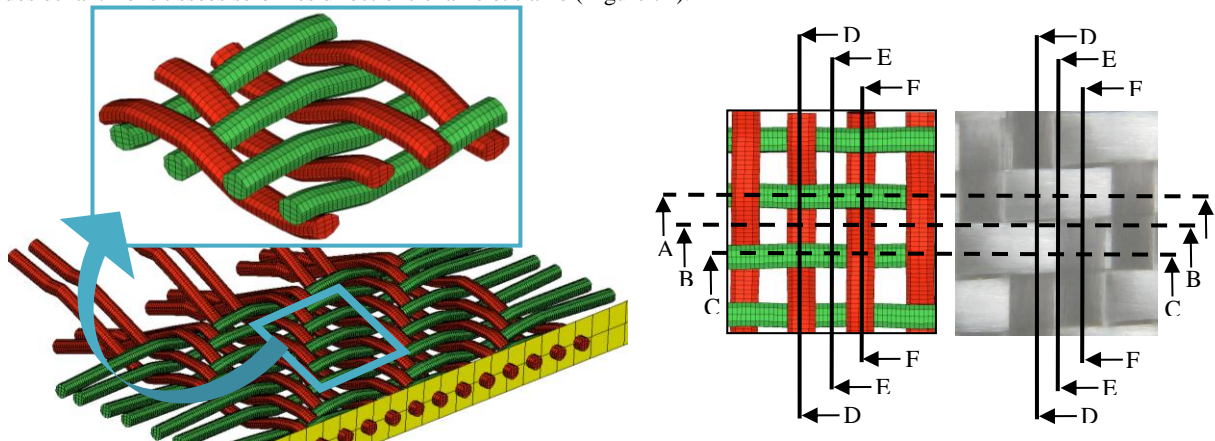


Figure 74. (gauche) représentation du motif élémentaire du tissu 2D d'armure croisé 2-2 - (droite) représentation des directions des plans de coupe du motif tissé réel et simulé.

La comparaison des sections des fils de chaîne du tissu simulé et du tissu réel, effectuée selon les différents plans de coupe D-D, E-E et F-F correspondant à différentes positions des fils de trame dans le tissu, semble montrer une même distribution de la position des fils de chaîne régulée par la distribution de l'écartement régulier des fils de chaîne dans les broches du peigne lors des mouvements horizontaux simulés du peigne (Figure 75). Cependant, la géométrie de la section transverse du fil de chaîne dans le tissu numérique semble assez éloignée de celle du fil dans le tissu réel, par la non prise en compte de la tension des fils de chaîne dans le modèle numérique et cumulée à la réduction du nombre de points de liage entre les fils de chaîne et trame pour l'armure croisé 2-2, ce qui a pour conséquence globale de diminuer l'effort de compaction des fils entre eux sur le changement de géométrie.

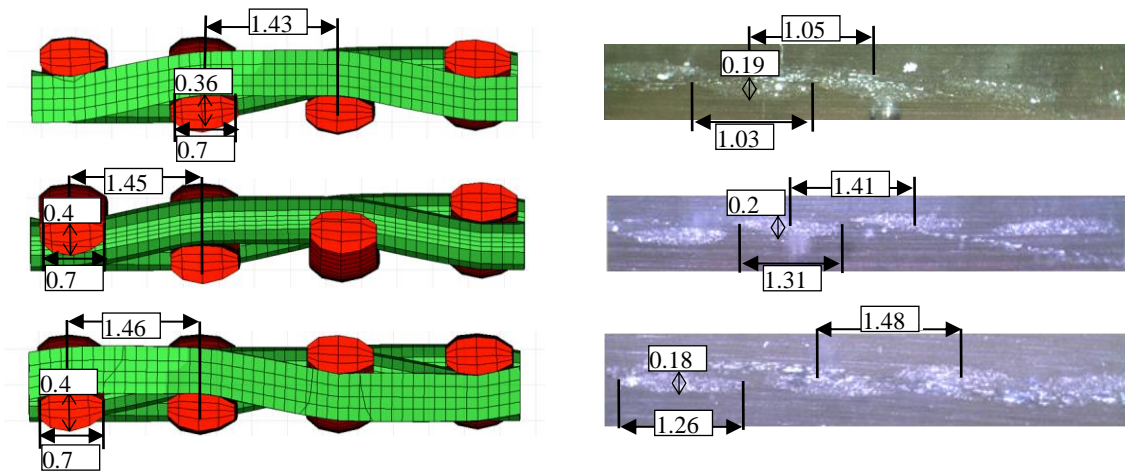


Figure 75. Comparaison des sections simulées (gauche) et réelles (droite) des fils de chaîne du tissu 2D d'armure croisé 2-2 pour les différents plans de coupe A-A, B-B et C-C.

De la même façon, l'insuffisance de la compression transverse sur le fil combinée à la diminution des points de liaages entre les fils de chaîne et trame de l'armure croisé 2-2, ont conduit aux mêmes résultats de comparaison des sections des fils de trame du tissu simulé et du tissu réel, représentées selon les différents plans de coupe D-D, E-E et F-F, et correspondant à différentes positions des fils de chaîne dans le tissu (Figure 76).

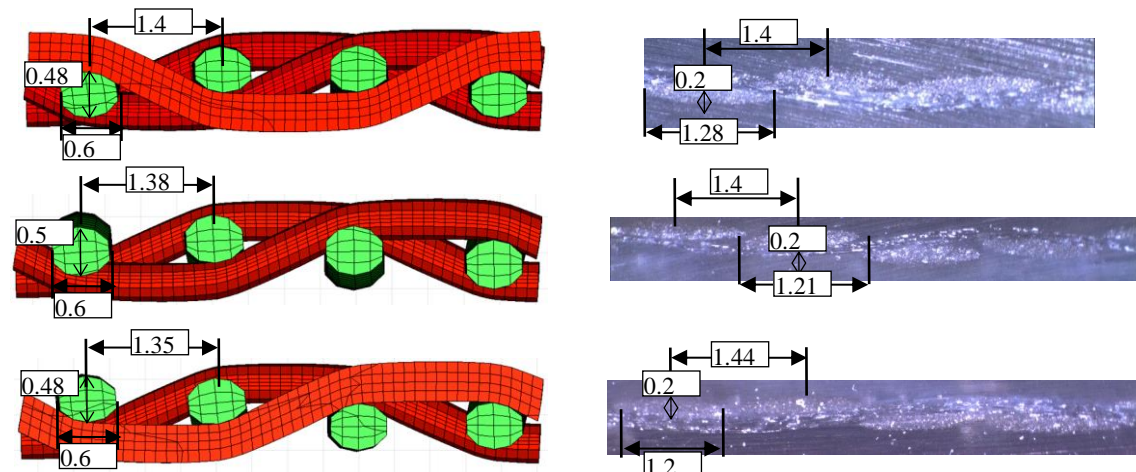


Figure 76. Comparaison des sections simulées (gauche) et réelles (droite) des fils de trame du tissu 2D d'armure croisé 2-2 pour les différents plans de coupe D-D, E-E et F-F.

#### D. Conclusion sur l'observation et l'analyse du procédé de fabrication

L'observation combinée des séquences en vidéos rapides du mouvement des fils de chaîne avec les mesures in-situ et en temps réel des fils capteurs au cours du procédé de fabrication a permis de retrouver l'incidence du mouvement périodique de 2,4 s des cadres sur la distribution cyclique des contraintes sur les fils. De plus, les différentes mesures effectuées sur les différents fils capteurs ont mis en évidence la non homogénéité des valeurs de contraintes appliquées aux fils par les différents types de cadre, en raison de positionnements variés dans la profondeur de la foule. Dans le cadre de la production de tissu 3D interlock chaîne à base de fils de verre E sur la machine à tisser industrielle, il a été montré que la position basse des cadres a été plus contraignante pour les fils de chaîne en terme de tension et de dégradation par frottement dynamique en contact avec les lances rigides bi-latérales d'insertion des fils de trame.

Le modèle de la cinématique de tissage précédemment proposé a permis de reproduire par simulation numérique la dynamique de la formation du tissu d'une machine à tisser industrielle. Les caractéristiques géométriques principales des tissus produits sur la machine à tisser virtuelle sont en accords avec leurs équivalents produits sur la machine à tisser réelle pour les paramètres de tissu suivant : armure toile, densité chaîne et trame de 7 fils/cm, fils de chaîne et trame EC9-300 Z50. En ce qui concerne la simulation des étapes principales de formation d'un tissu, les représentations du flotté des fils, de la forme des sections transverses pour le tissu d'armure toile et des zones de contact entre les fils de trame et les fils de chaîne sont fortement similaires aux observations réelles sur machine à tisser industrielle.

### III. Optimisation du procédé de tissage adapté aux tissus 3D interlocks chaines

Sur la base des principaux mouvements de la formation d'un tissu 2D et pour les besoins des productions de tissus effectuées dans le cadre de nos travaux de recherche [39][40][41][42][43] [8], nous avons adapté nos outils de production au tissage des tissus 3D interlocks chaines, afin d'éviter des problèmes de « tissabilité » ou de géométrie de structures non conformes [44]. Des entreprises, telles que 3Tex [45] et Shape 3 [46], ont développé de nouvelles machines adaptées au tissage des tissus 3D interlocks chaines, dont une insertion simultanée des fils de trame dans les différentes foules des nappes de fils de chaîne, augmentant ainsi les vitesses de production.

Ainsi, le tissage des structures 3D interlocks chaines se fonde sur la technique de tissage des tissus 2D [3] (Figure 77). Les éléments de la machine à tisser comme les cadres, les lisses et l'insertion du fil de trame à travers la foule sont identiques. La différence majeure repose sur la distribution des fils de chaîne, divisés en trois types: les fils de chaîne de liage, les fils de chaîne de surface et les fils de chaîne de renfort [47][48].

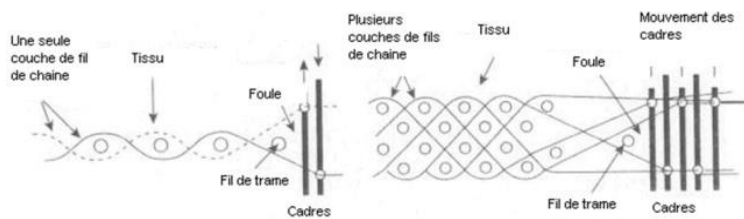


Figure 77. Comparaison du procédé de tissage 2D et du tissage 3D interlock chaîne [44].

Contrairement au tissage 2D, le tissage 3D interlock chaîne nécessite plusieurs alimentations de fils de chaîne qui correspondent de préférence au nombre d'évolutions différentes de ces fils dans la structure tissée 3D (Figure 78). Le principe de tissage est ensuite similaire, nous retrouvons le mouvement des cadres et l'ouverture de foule qui permettent l'insertion du fil de trame dans les différents plans de la structure tissée [49].

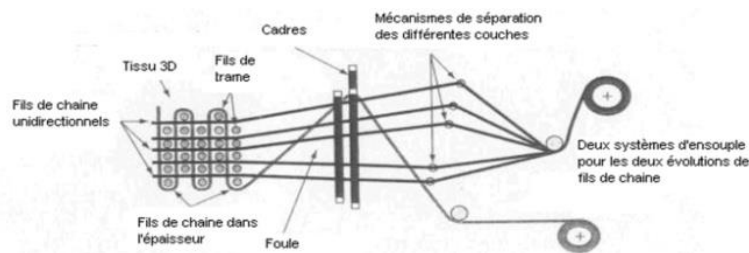


Figure 78. Sélection des différents types de fils de chaîne pour le tissage 3D interlock chaîne [44].

#### A. Optimisation sur une machine à tisser industrielle

Dans le cadre des travaux de recherche de Vilfayeu [8] et de Trifignu [9], nous avons adapté une machine à tisser industrielle à la fabrication de tissus 3D interlocks chaines comprenant deux types différents de roving (fil à base de multifilaments non retordus) de verre E, tels que : du 300 Tex du fabricant Owens Corning ® [50] et du 900 Tex du fabricant PPG [51]. Cependant, nous avons observé précédemment que l'application d'une torsion au fil para-aramide de type multifilaments apporte une cohésion supplémentaire au fil et empêche la formation importante de fibrilles durant le tissage [52], ainsi que sur du roving à base de lin [53]. Ces fibrilles empêchent d'avoir une ouverture de foule correcte lors de l'insertion du fil de trame, ce qui rend cette opération difficile et très dégradante pour les fils de chaîne, jusqu'à leur rupture.

Il a été observé que l'ajout d'une légère torsion au fil de type multi-filaments de verre E, comprise entre 10 et 30 tours/m, peut améliorer ses propriétés mécaniques [54] et surtout améliorer le glissement au contact d'un autre fil. Ainsi, les deux types de roving de verre de nos travaux de recherche ont été retordus à 25 tours/m pour pouvoir faciliter le tissage à une vitesse de 100 coups/min en laize 120 cm.

La première adaptation effectuée sur la machine à tisser industrielle, de type DORNIER (HTVS-S/4) [55] équipée de 24 cadres en laize maximale 140 cm (avec possibilité de "délaizage" jusqu'à 80 cm), a consisté à positionner les différents types de fils de chaîne sur les cadres en fonction : de leur évolution dans la structure tissée 3D, du type de foule (oblique ou rectiligne) et du type de tissage du peigne (pas ouvert ou fermé).

En effet, plus le nombre de cadres sélectionnés de la machine à tisser, pour réaliser le nombre d'évolutions de fils chaîne nécessaire du tissu 3D interlock chaîne, est grand; plus la course des cadres est augmentée pour conserver une même valeur d'angle de la foule, ce qui augmente les efforts dynamiques exercés sur la section transversale des fils de chaîne. Dans le cadre de notre étude, nous avons optimisé l'utilisation des 13 cadres nécessaires sur la machine à tisser pour réaliser les trois types de tissus 3D interlock chaîne en répartissant les 8 premiers cadres à l'évolution des fils de chaîne de liage (du cadre 1 à 4 pour l'évolution 1 et du cadre 5 à 8 pour l'évolution 2, opposée à l'évolution 1), puis les cadres 9 à 11 pour les 3 couches des fils de chaîne de renforts, et enfin les cadres 12 et 13 attribués à la sélection des fils de chaîne de type « pas de gaze » permettant de bloquer les lisières (bords) du tissu. Les fils de chaîne de type "pas de gaze" sont montés sur des bobines indépendantes, ne sont pas en fibres de verre et n'interfèrent pas avec la nappe des fils de chaîne de liage et de renfort.



Figure 79. Positionnement des fils de chaîne sur les cadres de la machine à tisser industrielle pour le tissage de tissus 3D interlocks chaines.

Deux types de foules peuvent être obtenus : une foule rectiligne et une foule oblique (Figure 80). La foule rectiligne est caractérisée par une course constante de l'évolution des fils de chaîne introduits dans les lisses et la foule oblique par une course variable [3][56].

Dans le cas du tissage 3D interlock chaîne, la tension exercée sur la nappe des fils de chaîne étant importante, les angles d'ouverture sont légèrement réduits et la foule est très peu déformable pour laisser passer la lance conduisant le fil de trame. On préfère donc utiliser la foule oblique qui garantit un angle de foule unique et constant quel que soit l'évolution des cadres.

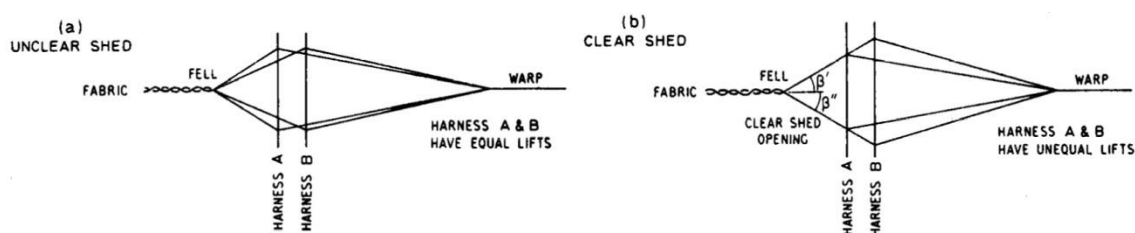


Figure 80. Principe d'ouverture de foule oblique (a) et de foule rectiligne (b) [3].

Suite à l'insertion du fil de trame dans la foule, son tassement au point de formation du tissu par le mouvement dynamique du peigne peut être synchronisé avec les cadres des fils de chaîne, par réglage, et selon deux configurations; soit en foule ouverte ou en foule fermée (Figure 81) [3]. En foule ouverte, le tassement s'effectue juste avant le croisement des nappes de fils de chaîne par le mouvement des cadres, et en foule fermée juste après.

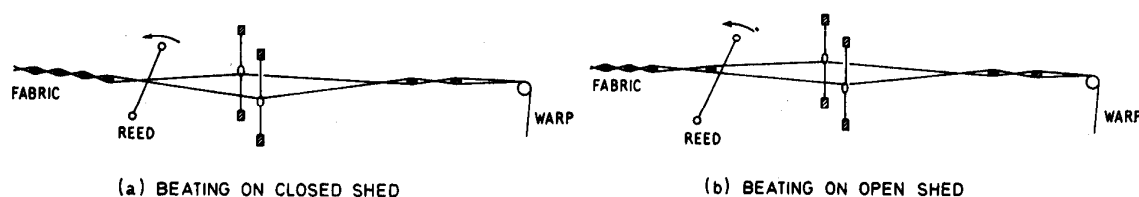


Figure 81. Configurations du tassement du fil de trame par le peigne de la machine à tisser en foule fermée (a) ou en foule ouverte (b) [3].

Lors du tissage des tissus 3D interlocks chaines, effectué dans le cadre des travaux de recherche de Vilfayeau [8], le positionnement des fils de trame aux différentes couches dans l'épaisseur de la structure tissée 3D s'est effectué avec moins de frottement et de dégradation des fils en tassement de fil de trame en foule ouverte qu'en foule fermée.

La seconde adaptation effectuée sur la machine à tisser industrielle, de type DORNIER (HTVS-S/4) [55], a consisté à positionner les fils de chaîne de renfort sur l'ensouple initiale et à ajouter une seconde ensouple pour les fils de chaîne de liage permettant ainsi de gérer les différences importantes de consommation des fils de chaîne au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne (Figure 82).



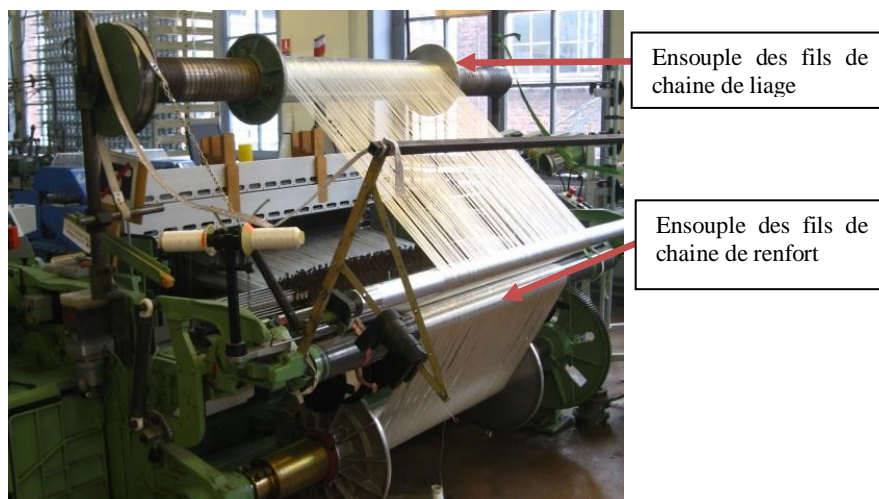


Figure 82. Positionnement des fils de chaîne de renfort et de liage sur des ensouples distinctes pour le tissage 3D interlock chaîne.

Enfin, lors du tissage 3D interlock chaîne effectué dans le cadre des travaux de recherche de Vilfayeu [8], nous avons positionné une barre (cylindre en aluminium) au niveau du point de formation du tissu, ce qui devient l'équivalent d'un temple tout laize, pour restreindre l'oscillation verticale du tissu déjà formé, due aux phénomènes de tension ayant lieu lors du tissage 3D interlock chaîne.



Figure 83. Positionnement d'un "temple tout laize" (barre cylindrique) sur le tissu au niveau du point de façure.

Sur la base de toutes ces adaptations effectuées sur la machine à tisser industrielle de type DORNIER (HTVS-S/4) [55], nous avons réalisé dans le cadre des travaux de recherche de Vilfayeu [8] et Florimond [57], trois types d'architectures tissées en verre E de tissus 3D interlocks chaînes combinés avec deux titrages de fils de verre E (300 et 900 Tex), nous permettant d'aboutir à différentes valeurs de masse surfacique et d'épaisseur (Tableau 17).

Tableau 17. Masse surfacique et épaisseur des tissus 3D interlocks chaînes.

	Tissu Interlock O - Liage T 1-4-4 avec fils de renforts (base armure toile)		Tissu Interlock O - Liage T 2-4-4 avec fils de renforts (base armure croisé 2-2)		Tissu Interlock A - Liage T 7-4-4 avec fils de renfort (base armure satin 8)	
Titration des fils	300 Tex	900 Tex	300 Tex	900 Tex	300 Tex	900 Tex
Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> )	1732	2722	1762	3060	1657	3090
Épaisseur (mm)	1,5	3,1	1,7	4	2,4	4,3

Les observations globales et planes de la surface tissée des tissus 3D interlocks chaînes, pour les différentes architectures combinées aux deux titrages de fils de verre E ainsi que les observations locales et 3D d'échantillons de tissus 3D interlocks chaînes par le biais des images tomographiques, nous ont permis de valider la régularité et la qualité de la production (Figure 84, Figure 20 et Figure 21).



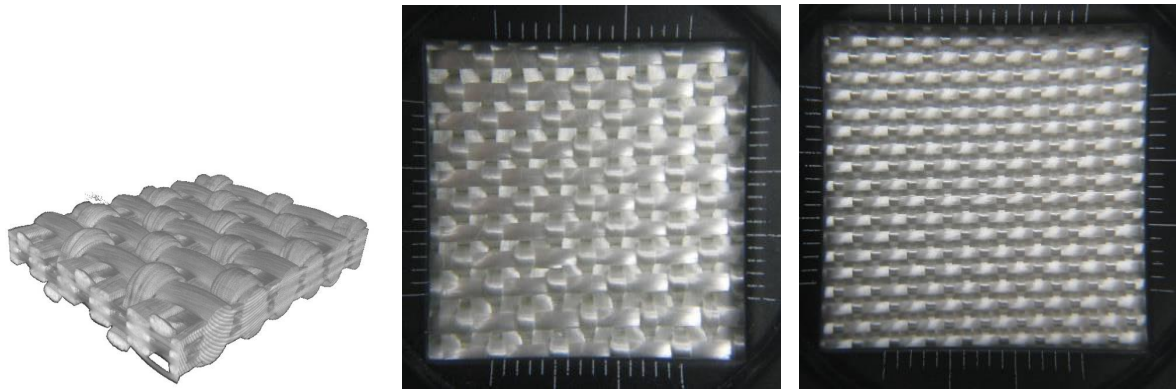


Figure 84. (gauche) représentation 3D par images tomographiques du tissu Interlock O - Liage T 1-4-4 avec fils de renforts (base armure toile) - (milieu) vue de dessus avec des fils de verre E de 900 Tex - (droite) vue de dessus avec des fils de verre E de 300 Tex.

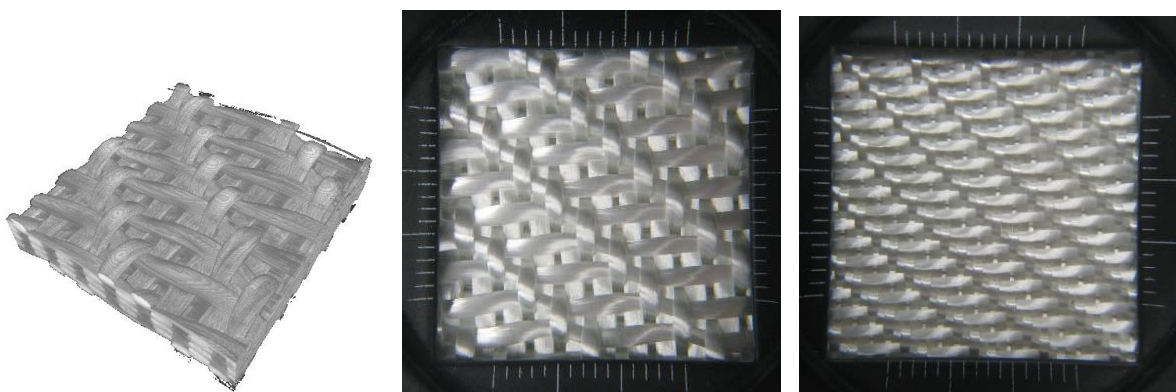


Figure 85. (gauche) représentation 3D par images tomographiques du tissu Interlock O - Liage T 2-4-4 avec fils de renforts (base armure croisé 2-2) - (milieu) vue de dessus avec des fils de verre E de 900 Tex - (droite) vue de dessus avec des fils de verre E de 300 Tex.

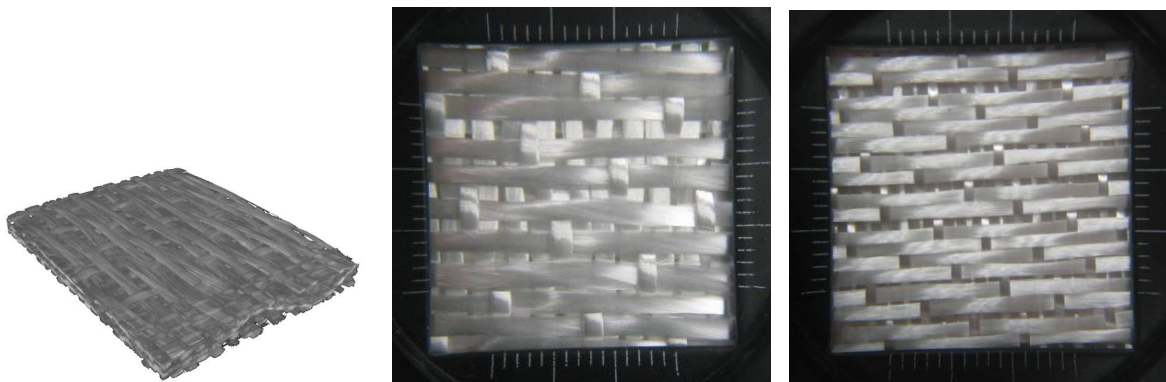


Figure 86. (gauche) représentation 3D par images tomographiques du tissu Interlock A - Liage T 7-4-4 avec fils de renfort (base armure satin 8) - (milieu) vue de dessus avec des fils de verre E de 900 Tex - (droite) vue de dessus avec des fils de verre E de 300 Tex.

## B. Conception d'une machine à tisser de prototypage optimisée pour les tissus 3D interlocks chaines à base de fils autres que carbone

Ainsi, sur la base de nos premières expériences de tissage 2D [58][59][60][61][62], ou de tissage 3D interlock chaîne sur machine à tisser industrielle à insertion automatique [55] et sur machine à tisser de prototypage à insertion manuelle [63][64][65], nous avons conçu et réalisé intégralement une machine à tisser de prototypage adaptée aux tissus 3D interlocks chaines, à insertion automatique de fil de trame et avance automatique de la machine à tisser pour un tissage à plat du tissu [66]. Initialement, ce premier prototype de machine n'a pas été conçu pour tisser des fils conducteurs, dont les filaments dégradés au cours du tissage peuvent provoquer des court-circuits sur les parties électriques et électroniques non protégées. L'objectif principal de la conception de ce prototype de machine à tisser a été de minimiser les efforts et différences de tensions occasionnées sur les fils de chaîne lors du tissage des architectures tissées 3D interlocks chaines, afin de rendre la

production plus régulière tout en minimisant la dégradation des fils au contact des éléments dynamiques de la machine à tisser.

Nous avons opté pour une machine à tisser de type armuré équipée de 24 cadres, permettant ainsi 24 évolutions différentes des fils de chaîne au sein d'une architecture tissée. Afin de mieux gérer les différences de consommation et de tension des fils de chaîne associés à un cadre par l'étape de rentrage, nous avons choisi de faire correspondre une ensouple de fils de chaîne à chaque cadre. Ainsi, nous avons conçu et réalisé un cantre pouvant accueillir 24 ensouples de fils de chaîne (Figure 87 - gauche) dont l'ensemble des fils de chaîne sont positionnés dans deux planches d'empoutage assurant une distinction de positionnement des fils de chaîne en fonction de leur évolution dans l'épaisseur de l'architecture 3D tissée interlock chaîne mais aussi un non contact des fils entre eux pour en limiter le frottement (Figure 87 - milieu). A l'issue du montage des fils de chaîne sur ensouples et leur positionnement individuel au travers des planches d'empoutage, la mise en tension de l'ensemble des fils de chaîne (Figure 87 - droite) a été assurée pour chacun des fils de chaîne insérés dans chaque lisse, montée sur l'un des 24 cadres utilisés (Figure 88 - gauche). Une fois l'ensemble des fils de chaîne positionnés et mis en tension sur la machine à tisser, l'ouverture de la foule par l'action mécanique des cadres a permis d'insérer les fils de trame successivement (Figure 88 - milieu) afin de réaliser les structures tissées 3D interlocks chaînes (Figure 88 - droite). Dans le cadre de nos travaux de recherche [67], nous avons pu ainsi réaliser des tissus 3D interlock chaîne en tant que renfort fibreux pour un procédé de thermo-formage pour des pièces composites à base de fils de verre E/polypropylène de 820 Tex et de Twintex 1100 Tex pour des applications automobile, transport routier et ferroviaire [68][69].



Figure 87. (gauche) Cantre des 24 ensouples de fils de chaîne - (milieu) Planche d'empoutage de positionnement dans l'épaisseur des fils de chaîne - (droite) Vue complète du cantre d'ensouples et planche d'empoutage et mise en tension des fils de chaîne.



Figure 88. (gauche) passage des fils de chaîne dans les lisses des cadres - (milieu) insertion automatique du fil de trame par lance rigide unilatérale dans la foule formée par les fils de chaîne du tissu 3D interlock chaîne - (droite) vue complète du système de sélection automatique des cadres et mise en tension des fils de chaîne.

### C. Conception d'une machine à tisser de prototypage optimisée pour les tissus 3D interlocks chaînes à base de fils carbonés

En considérant nos premières expériences de tissage 3D interlock chaîne sur machine à tisser de prototypage à insertion manuelle [63] à base de fils de carbone [39][70][71][72][73] ou contenant des nanotubes de carbone [74][75], nous avons



conçu et réalisé intégralement une machine à tisser de prototypage, à insertion semi-automatique de fil de trame, dans la poursuite des travaux de recherche de Dufour [76]. La protection au court-circuit des parties électriques de la machine à tisser nous a permis de fabriquer des tissus 3D interlocks chaines à base de fils composés de multi-filaments de carbone.

Nous pouvons distinguer trois parties essentielles de la machine à tisser. La première partie (Figure 89- gauche) représente le système de mise en tension individuelle des ensouples de fils de chaîne de carbone, positionnées dans le cantre demi-circulaire, afin d'assurer une régulation indépendante des différences de consommation des fils de chaîne lors du tissage des structures tissées 3D interlocks chaines. La deuxième partie (Figure 89- milieu) représente la machine à tisser mobile en translation dans le sens des fils de chaîne sur un plan fixe et comprenant un système de sélection des 24 cadres pour assurer l'ouverture de la foule des fils de chaîne de carbone, un système d'insertion du fil de trame par navette actionnée par une crémaillère à mouvement réversible pour assurer l'aller et le retour de la navette, et enfin un système de peigne par deux vérins bilatéraux pour assurer un tassement par mouvement horizontal du peigne sur le fil de trame. La troisième partie (Figure 89- droite) permet de bloquer les nappes de fils de chaîne permettant d'en assurer la mise en tension par couche de fils positionnés dans l'épaisseur du tissu 3D interlock chaîne lors du démarrage du tissage.



Figure 89. (gauche) Système de mise en tension individuelle des ensouples sur cantre - (milieu) système de sélection des cadres et d'insertion de fil de trame manuelle par navette - (droite) système de blocage des nappes de fils de chaîne.

#### D. Conclusion sur l'optimisation du procédé de fabrication adapté aux tissus 3D interlocks chaines

La géométrie particulière des structures tissées 3D interlocks chaines nécessite : d'adapter la machine à tisser en vue d'optimiser les différences d'évolutions et de consommation des fils de chaîne, de positionner dans l'épaisseur du tissu les différents fils de chaîne de renfort ainsi que les différents fils de trame permettant de constituer le nombre de couches souhaité, et de choisir judicieusement les options de montage des fils de chaîne pour réaliser les architectures tissées 3D interlocks chaines. S'ajoute à cela, la complexité de la mise en tension régulière et homogène de l'ensemble des fils de chaîne par l'utilisation de fils de type multi-filaments continus, avec ou sans torsion, ayant des valeurs d'allongement inférieures à 1% et dont les valeurs élevées du module de Young longitudinal limite le comportement élastique en terme de déformation. Les fibrilles, issues des filaments de carbone et créées lors du frottement dynamique entre les fils lors du tissage, sont dispersées sur les différents éléments de la machine à tisser, nécessitant une étanchéité complète de toutes les parties électriques.

La vitesse de production de la machine doit alors s'adapter à ces conditions supplémentaires de réalisation des tissus 3D interlocks chaines afin d'éviter des dégradations plus ou moins importantes des fils de chaîne et trame au cours des mouvements dynamiques de la machine à tisser.

## IV. Endommagement matière au cours du tissage 3D interlock chaîne

Lors du procédé de tissage, les contraintes mécaniques dynamiques appliquées sur fils de chaîne et trame sont une cause principale de la dégradation des performances de la matière. Les principaux types d'endommagements sont dus à l'abrasion des fibres, leur casse et la distorsion des fils dans le plan et dans l'épaisseur [42]. Lors du tissage, les fibres subissent des dégradations relatives à leur manipulation, aux contacts avec les éléments de la machine mais aussi selon l'architecture du tissu 3D interlock chaîne [40]. La résistance à la traction des fils à base de multi-filaments de carbone subissent un changement important depuis la bobine jusqu'au tissu 3D interlock chaîne par les différentes opérations du procédé de fabrication et par la trajectoire du fil à l'intérieur du tissu, dépendante de l'architecture tissée 3D interlock chaîne. La résistance à la rupture d'un fil individuel est affectée après son intégration dans le tissu ainsi que dans le matériau composite final lors de son imprégnation par de la résine [39].

## A. Analyse de l'endommagement des fils lors du procédé de tissage

Avant de débiter l'ensemble de nos travaux de recherche sur les solutions de protection à l'impact balistique à base de renfort tissé 2D, nous avons comparé les valeurs, issues des tests quasi-statiques de traction uni-directionnelle, des caractéristiques mécaniques des fils de para-aramides TWARON™ [77] seuls avec les caractéristiques des tissus, mesurées dans les sens chaîne et trame [78]. En comparant, pour l'ensemble des titrages des fils de para-aramides TWARON™ [77], les valeurs de ténacité de chaque titrage de fils seuls avec les valeurs de ténacité résiduelle du fil dans le tissu, nous avons montré que la perte de ténacité initiale du fil apparaît plus importante dans le sens chaîne que dans le sens de la trame; respectivement [29,64 à 39,82%] dans le sens chaîne et [24,48 à 33,80%] dans le sens trame. Cette différence s'explique par le fait que les fils de chaîne sont soumis à des contraintes et des endommagements supplémentaires pendant le procédé d'ourdissage et de tissage. Nous avons mis en évidence que la densité du nombre de points de liage entre les fils de chaîne et trame par unité de surface du tissu, dépendant de l'armure tissée combinée aux densités des fils de chaîne et trame par unité de longueur et largeur du tissu, ont tendance à influencer directement sur la perte de résistance à la rupture du fil inséré dans le tissu [79].

Sur la base de cette méthodologie de comparaison des valeurs, nous avons effectué le même type de comparaison à partir des fils carbonés (6K) de type IM7 ( $\rho = 1,75 \text{ g/cm}^3$ ) en 223 Tex en chaîne et trame, utilisés au sein des 3 architectures différentes des tissus 3D interlocks chaînes de type : Interlock A - Liage T 5-5-5, Interlock A - Liage L 3-3-5 et Interlock A-Liage L 2-2-5 [80][81][82]. Dans le cadre de nos travaux de recherche [83][84], nous avons pu ainsi étudier, via un coefficient de transfert de charge défini par Cristian et al. [85], l'influence de la géométrie de la structure tissée 3D interlock chaîne sur la perte de ténacité des fils de carbone 6K - IM7 de 223Tex depuis la valeur initiale issue de la bobine jusqu'aux valeurs mesurées à la fois au sein des tissus secs et résinés.

Les travaux de recherche de Cox et al. [86] ont analysé la flexion subie aux points de croisement entre les fils de chaîne et trame, et ont pu la mesurer via l'introduction d'un facteur de perte de rigidité. En effet, au point d'entrecroisement d'un fil de chaîne et d'un fil de trame, les fils changent d'inclinaison et subissent alors une flexion, plus prononcée pour le fil de trame que le fil de chaîne soumis à une tension sur machine à tisser plus importante. Ainsi, l'endommagement provoqué par cette flexion, dépendante de la densité des fils et du rayon de courbure local que peut accepter un fil, défini par son nombre de fibres, peut créer des zones de concentration de contraintes et provoquer ainsi une diminution possible du module et de la résistance en traction. Cette étude a été complétée [87] par des essais de traction sur des composites à base de tissus 3D interlocks chaînes et ont permis de distinguer trois phases différentes de déformation : une phase élastique, une phase d'écrouissage et enfin une phase de rupture. La phase d'écrouissage, plus particulièrement détaillée par John [88], montre les effets des endommagements longitudinaux et transverses des fils sur l'initiation du mode de rupture de la structure composite. L'étude du procédé de tissage [4] des tissus 3D interlocks chaînes a permis de constater l'endommagement des fils de chaîne de carbone et de mesurer leur perte de ténacité à la rupture à hauteur de 12 %. Quel que soit le matériel utilisé, les fils subissent des abrasions dues au frottement avec la machine mais aussi des fils entre eux notamment lors du montage des fils de chaîne et de l'ouverture de foule. Ainsi, l'un des moyens proposé pour réduire les endommagements par frottement a consisté à recouvrir les parties de la machine à tisser en contact avec les fils d'un matériau à faible coefficient de friction, tel que du PTFE (Poly-tétra-fluoro-éthylène).

Dans les travaux de recherche de Lee et al. [89], l'endommagement des fils durant le tissage a été caractérisé par des essais de traction sur des fils seuls à différentes étapes du tissage, puis sur les fils résinés et les matériaux composites à base de tissus 3D interlocks chaînes à liage orthogonal, montrant ainsi une diminution de 50% de la résistance en traction mais une faible réduction du module élastique de l'ordre de 7%.

Ce phénomène de dégradation des fils par le procédé de tissage peut être amplifié par la suite lors de la mise en œuvre sous vide du composite [90], compactant le renfort et créant alors des zones de déformation locale, notamment aux points d'entrecroisement entre les fils de chaîne et trame.

Des travaux complémentaires ont montré que les fils de verre de liage d'un tissu 3D interlock chaîne à liage orthogonal subissent une diminution de leur résistance plus importante que celle des autres fils en raison de leur courbure plus importante dans l'épaisseur [48], allant jusqu'à 50 % de la résistance initiale et 7 % du module initial. Cette perte de propriété peut être imputée à la fragilité de la fibre de verre, de la perte de l'ensimage par abrasion des fils entre eux mais aussi aux différentes manipulations du fil durant le tissage 3D interlock chaîne. De plus, les fils de chaîne de liage apparaissent comme étant la principale source de distorsion entre les fils de chaîne de renfort et les fils de trame, entraînant leur déplacement dans les directions chaîne et trame, ce qui modifie localement la géométrie initiale de la structure tissée 3D interlock chaîne [91].

Lors de la fabrication du tissu 3D interlock chaîne, la géométrie des structures joue également un rôle important dans la dégradation des fils, jusqu'à 35% de perte de ténacité pour des fils de verre S2 [5]. Nous avons également montré dans le cadre des travaux de recherche de Nauman [92] que l'ouverture de foule et le mouvement des cadres endommagent fortement les fils avec une perte de ténacité à la rupture de 42 % pour des tissus 3D interlocks chaînes à base de fils de carbone. Enfin, dans une étude récente d'Archer [93], réalisée à partir de différentes compositions de fils de carbone; respectivement 3, 6 et 12K, un prélèvement de ces différents fils a été effectué à 4 étapes successives : sur la bobine initiale, sur la bobine issue de l'étape de bobinage juste avant son positionnement dans le cantre de la machine à tisser, puis juste après leur passage dans les lisses des crochets de la mécanique Jacquard et enfin extrait du renfort tissé 3D interlock chaîne. Les géométries des tissus 3D interlocks chaînes ont été réalisées selon deux types de liage: couche à couche et à travers l'épaisseur, et les tissus fabriqués sur une machine Jacquard à vitesse d'insertion de 120 coups/min pour une laize de 140cm. Une dégradation globale de 9,3% a été mesurée pour chaque fil, se décomposant en 5% à l'issue du bobinage, 1,5% au niveau des crochets de la mécanique Jacquard et 2,8% extrait du tissu 3D interlock chaîne.

Sur la base de cette dernière étude, nous avons également mesuré, aux différentes étapes du procédé de fabrication du tissu 3D interlock chaîne, l'endommagement des fils de verre E (300 Tex)[8][9] sur machine à tisser industrielle et de para-aramide Kevlar-29 (3300 dTex) sur machine à tisser de prototypage [42].

## B. Analyse de l'endommagement des fils sur machine à tisser industrielle

Lors de la production des tissus 3D interlocks chaines à base de fils de verre E (300 Tex), nous avons pu observer une dégradation par cisaillement transverse des filaments continus de verre E qui ont alors engendré des casses de fils de chaîne sur toute la largeur du tissu (Figure 90). Plus de frottements ont été constatés, lors du changement d'architecture tissée notamment, car les fils de chaîne se sont légèrement détendus, provoquant ainsi des casses de filaments lors du recul du peigne. Les pinces des lances mécaniques bilatérales, qui assurent l'insertion du fil de trame, ont provoqué également du frottement dynamique au contact de la nappe des fils de chaîne ce qui a endommagé les filaments des fils de verre E par cisaillement transverse. Des casses de filaments, provoquant l'apparition de fibrilles, ont été rencontrées sur l'ensouple des fils de chaîne de liage lors des changements d'architecture par une modification de la tension globale. L'optimisation de l'ouverture de la foule, par le réglage de la hauteur adéquate des cadres combiné au réglage de la tension globale sur l'ensouple des fils de chaîne de liage, a permis de diminuer ces apparitions de fibrilles. Par ailleurs, l'apport d'ensimage anti-électrostatique (composé d'isopropanol et d'hexane) sur les fils de chaînes lors de la production, dans la zone de formation du tissu, a permis de diminuer les endommagements dus aux frottements.



Figure 90. Observation des casses de fils de chaîne lors de la production des tissus interlocks en fils de verre E de titrage 300 Tex.

En complément de ces observations de dégradation occasionnée sur les fils, nous avons pu identifier, dans le cadre des travaux de recherche de Trifigny [9], plus précisément les différents éléments de la machine à tisser en contact avec les fils par ordre chronologique, pouvant générer des contraintes locales sur chaque fil conduisant à une variation globale de la tension de la nappe des fils de chaîne.

Ces éléments de la machine à tisser sont respectivement : le cylindre porte-fils sur lequel glisse par contact à faible vitesse la nappe des fils de chaîne de l'ensouple vers les cadres, les lamelles casse-chaînes en suspension sur les fils pour en détecter la casse par une baisse dynamique de la tension, les cadres qui soulèvent ou baissent dynamiquement la nappe des fils de chaîne par contact des lisses avec les fils de chaîne et occasionnent des effets vibratoires le long des fils lors de la formation de la foule pour permettre l'insertion dynamique du fil de trame. Le mouvement à grande vitesse du peigne, qui assure le tassage du fil de trame au point de formation du tissu, provoque à la fois des frottements dynamiques par contact des dents sur la partie longitudinale des fils de chaîne et des pics de tension sur les fils localisés au point de façure. Et enfin le rouleau d'appel qui assure l'enroulement du produit tissé et maintient la tension globale de la structure tissée sur la machine à tisser.

La valeur de la tension moyenne des fils de chaîne est donc croissante à mesure que l'on se rapproche du point de façure du tissu.

Dans le cas de la production des tissus 3D interlocks chaines en verre E (300 Tex) sur la machine à tisser industrielle, la vitesse moyenne de tissage a été de 100 coups/min, avec une fréquence des coups de peigne de 1,67 Hz. Le déplacement imposé par le coup de peigne sur le tissu formé a été mesuré par le biais de caméra rapide pour une valeur de quelques millimètres. Les mouvements des cadres dépendent de l'armure tissée, mais leur fréquence est indexée sur celle du peigne. Dans le cas du tissage des tissus 3D interlocks chaines à quatre couches, la fréquence des mouvements des cadres est 4 fois plus lente que les coups de peigne, soit 0,42 Hz. L'amplitude de l'allongement provoquée par un mouvement des cadres est d'environ 1 %.

Dans les précédentes études de Chepelyuk et al. [6] et Choogin et al. [7], l'analyse par oscillogramme des valeurs de tension exercées sur les fils de chaîne a permis de comprendre les phénomènes dynamiques appliqués localement sur le fil. Il en résulte, suite à une série d'observations et en faisant varier différents paramètres (tels que: densité en fils de trame, ouverture de la foule, type de tassement du peigne), que les types d'ouverture de foule et la tension exercée sur chaque nappe de fils en fonction du type de tissage réalisé influent sur la géométrie résultante de la structure tissée.

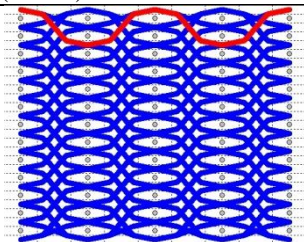
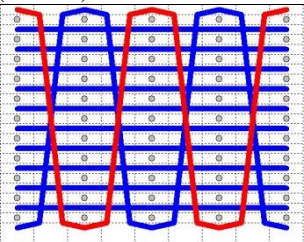
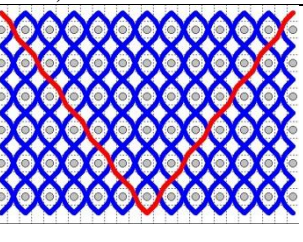
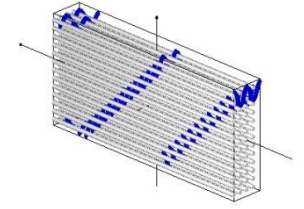
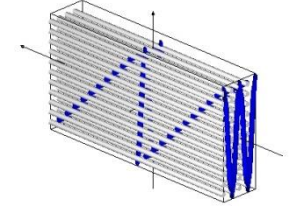
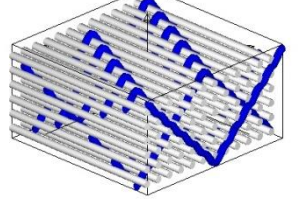
Au-delà des adaptations apportées sur la machine à tisser industrielle de type DORNIER (HTVS-S/4), qui nous ont permis de réaliser différentes productions de tissus 3D interlocks chaines à base de multi-filaments de verre E continus et faiblement retordus, nous avons constaté les limites de ces adaptations à cette machine industrielle initialement conçue pour la production à grande vitesse de tissus à architecture 2D. Ainsi, pour répondre à nos besoins de fabrication, dans le cadre de nos travaux de recherche, et pour adapter le procédé de fabrication au tissage 3D interlock chaîne, nous avons conçu et fabriqué deux prototypes de machine à tisser; l'une adaptée pour les fils à base de filaments conducteurs (type carbone ou particule de noir de carbone) et l'autre machine à tisser pour tous les autres types de fibres.



### C. Analyse des endommagements des fils sur machine à tisser de prototypage

Dans le cadre des travaux de recherche de Lefebvre [42], nous avons pu suivre, à chaque étape de la fabrication, depuis la bobine de fil jusqu'au tissu 3D interlock chaîne, l'endommagement des fils para-aramides Kevlar-29 (3300 dTex) [94] pour les différentes architectures tissées 3D [52] réalisées sur notre machine à tisser de prototypage à insertion manuelle [63][64]. Cette étude s'est décomposée en deux étapes principales; une première étape de caractérisation mécanique du fil para-aramide Kevlar-29 (3300 dTex) par des essais de traction et d'optimisation de la valeur de torsion à appliquer sur le fil, initialement non retordu, pour s'assurer de sa cohésion lors des étapes de tissage et diminuer ainsi la perte de fibres par frottement. Enfin, une seconde étape de mesure de l'endommagement du fil pour trois architectures tissées 3D interlocks chaînes (Tableau 18) permettant de montrer l'influence de la géométrie sur la dégradation des fils.

Tableau 18. Caractéristiques physiques des trois architectures tissées 3D interlocks chaînes

	Tissu Interlock O - liage L 1-2-13 base armure toile avec fils de chaîne de surface ("LtoL")	Tissu Interlock O - liage T 1-11-11 base armure toile avec fils de chaîne de renfort ("Ortho")	Tissu Interlock A - Liage T 11-6-6 base armure sergé façonné de 12 effet trame cordon à droite ("TtT")
Motif tissée			
Vue 3D			
Réduction chaîne (fils/cm)	40	40	40
Réduction trame (fils/cm)	52	55	40
Épaisseur (mm)	5,3	6,8	5,8
Masse surfacique (kg/m <sup>2</sup> )	2,9	3,9	2,3

#### 1. Optimisation de la valeur de torsion (tours/m) des fils de para-aramide Kevlar-29 (3300 dTex)

Lors de précédentes études, nous avons remarqué que l'application d'une torsion apporte une cohésion supplémentaire aux fils et limite la formation de fibrilles durant le tissage. Ainsi, une fois le fil réceptionné au sein du laboratoire, nous avons appliqué différentes valeurs de torsion au fil de para-aramide Kevlar-29 initialement non retordu, par pas de 25 tours/m jusqu'à 125 tours/m. Chaque fil retordu a été testé sur machine de traction, selon la norme NF EN ISO 2062 [95], équipée de deux mors à serrage manuel, à une vitesse quasi statique de 250 mm/min ( $4,16 \times 10^{-3}$  m/s) avec une charge appliquée de 1 kN (Figure 91). Nous pouvons constater que la plage de valeur s'étendant de 25 à 75 tours/m permet d'augmenter sensiblement la ténacité et le module du fil retordu, favorisant une meilleure cohésion des filaments au sein du fil. Pour des raisons de réglage machine sur retordeuse, nous avons opté pour une valeur de 25 tours/m pour les fils de para-aramide de Kevlar-29 (3300 dTex).

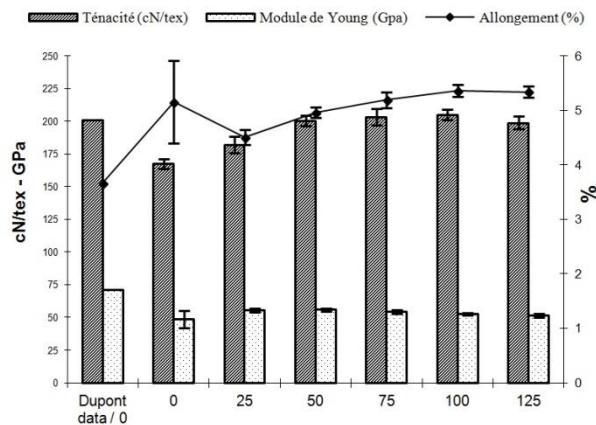


Figure 91. Optimisation de la valeur de torsion du fil de para-aramide Kevlar-29 (3300 dTex).

Lors du montage des fils de chaîne sur les différentes parties de notre machine à tisser de prototypage à insertion manuelle, nous avons pu constater une meilleure régularité de positionnement des fils de chaîne dans les ensouples (Figure 92 - gauche) ainsi que dans les planches d'empoutage (Figure 92 - milieu), permettant ainsi d'assurer une formation de foule sans dégradation des fils par frottement et ne laissant apparaître quasiment aucunes fibrilles (Figure 92 - droite).



Figure 92. (gauche) Cantré des ensouples de fils de chaîne - (milieu) positionnement des fils de chaîne dans les planches d'empoutage - (droite) Ouverture de la foule sans fibrilles.

## 2. Mesure de la dégradation des fils lors de la fabrication du tissu 3D interlock chaîne

Nous avons comparé les valeurs moyennes de traction et d'allongement (10 mesures par fil et par étape) des fils à l'issue de chaque étape de fabrication mais aussi extraits des trois architectures de tissu 3D interlock chaîne de type : Tissu Interlock O - liage L 1-2-13 base armure toile avec fils de chaîne de surface ("LtoL"), Tissu Interlock O - liage T 1-11-11 base armure toile avec fils de chaîne de renfort ("Ortho") et Tissu Interlock A - Liage T 11-6-6 base armure sergé façonné de 12 effet trame cordon à droite ("TtT") (Figure 93).

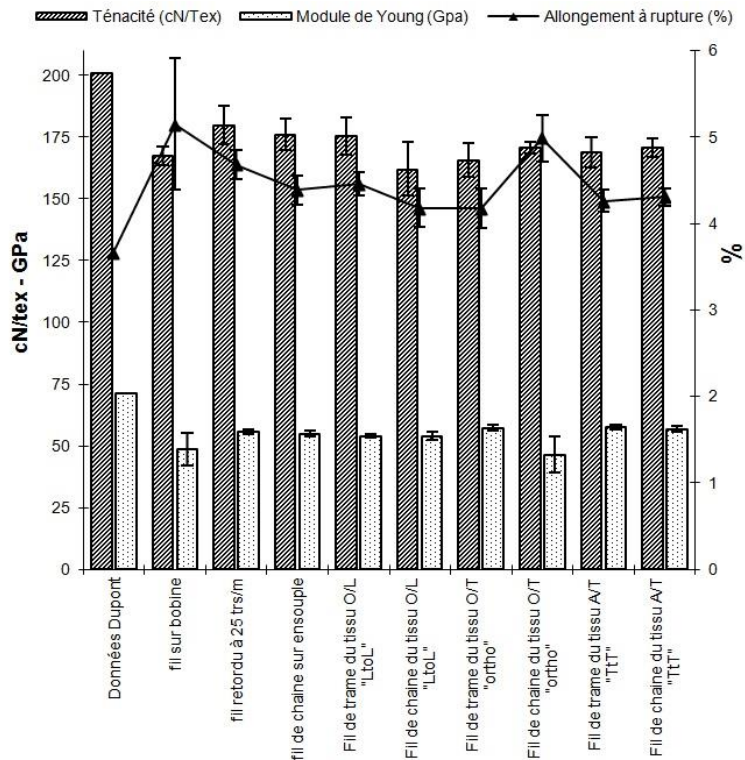


Figure 93. Comparaison des valeurs moyennes des ténacités, modules et allongements des fils de para-aramides Kevlar-29 (3300 dTex) à chaque étape de la fabrication des tissus 3D interlocks chaines.

L'ajout d'une torsion, à hauteur de 25 tours par mètre, a permis d'augmenter le module et la résistance à la rupture du matériau, respectivement de 10 GPa et d'environ 10 cN/Text, comblant ainsi les pertes occasionnées lors des étapes de préparation du fil de chaîne sur la machine à tisser; 1% de perte pour la ténacité à la rupture et 2% pour le module. Cependant l'ajout d'une torsion a des effets négatifs sur l'élongation qui diminue de 1%. Cette perte peut être imputée au fait que la torsion apporte une cohésion aux filaments ce qui rigidifie le fil et empêche un allongement adéquat. Concernant les architectures, nous remarquons que les fils de trame de la structure type « LtoL » montrent un meilleur comportement que les autres structures pour la ténacité à la rupture avec une perte de 2 % contre 8 et 6 % pour « l'Ortho » et le « TtT ». Cependant cette structure est la plus dégradante pour les fils de chaîne avec 10% de dégradation pour la résistance à la rupture, ce qui semble montrer une corrélation forte de comportement entre le sens chaîne et le sens trame de la structure tissée 3D interlock chaîne.

Concernant l'allongement à la rupture, les fils de trame subissent de fortes dégradations pour les structures « Ortho » et « TtT » avec respectivement 11 et 9% de pertes, ainsi que les fils de chaîne de la structure « LtoL » à hauteur de 11%.

Enfin le module des fils ne subit pas de fortes dégradations pour les structures "LtoL" et "TtT", sauf dans la structure « Ortho » où les fils de chaîne perdent 16% de la valeur initiale du module.

Les valeurs de perte de module indiquent qu'un faible pourcentage de fibres dans les fils ont été cassées. Les pertes de propriétés observées pour la ténacité à la rupture peuvent être imputées au fait que les fibres subissent de fortes dégradations durant le tissage entre les frottements subis entre les fils et par les éléments de la machine à tisser. L'abrasion engendrée a dégradé l'ensimage des fils, rendant les fibres plus fragiles par cisaillement transverse.

Cependant, nous pouvons souligner que les valeurs maximales de perte sont de 20% pour le module de Young, de 12% pour l'allongement à la rupture et 10% pour la ténacité, pour des fils para-aramides Kevlar-29 de 3300 dTex retordus à 25 tours/m et pour l'ensemble des tissus 3D interlock chaîne; ce qui semble tout à fait acceptable comparativement aux résultats obtenus dans d'autres travaux de recherche [89][48][93].

## D. Conclusion sur l'étude de l'endommagement matière au cours du tissage 3D interlock chaîne

A l'issue de ces différentes études de recherche, nous pouvons constater l'influence du procédé de fabrication sur la dégradation des fils lors du procédé de tissage des architectures tissées 3D interlocks chaines. Différentes solutions ont été envisagées pour minimiser la dégradation des fils, en adaptant le procédé aux types de matière première des fils et de leur constitution (mono ou multi-filaments): par la réduction de la vitesse de tissage, la réduction des zones de frottement entre fils (système de guidage individuel des fils par planches d'empoutage, barres de sélection) et le recours à des ensimages (lubrification des fils). Nous pouvons proposer également : des matériaux à faible coefficient de frottement pour les éléments de la machine à tisser en contact avec les fils ainsi que le réglage individuel de la tension des fils de chaîne ayant les mêmes évolutions au sein de la structure tissée, et plus particulièrement pour les architectures tissées 3D interlocks chaines dont le mouvement des fils dans l'épaisseur favorise une augmentation de la consommation des fils.

## V. Synthèse

Afin de compléter notre compréhension du procédé de tissage, nous avons observé les effets dynamiques des éléments de la machine à tisser sur les changements de position ou de géométrie de la section transversale des fils, à la fois par le biais d'images issues de vidéos rapides mais aussi par la mesure des contraintes appliquées sur les fils, par le biais de fil capteur innovant. Sur la base de ces observations, nous avons fourni un modèle de la cinématique de la formation du tissu pour nous permettre d'en reproduire les principaux mouvements par simulation. Les géométries des tissus, issues de la simulation, apparaissent similaires aux géométries des tissus produits sur machine à tisser, démontrant ainsi la bonne reproduction de la cinématique du procédé de tissage et son influence sur la géométrie finale du tissu 3D interlock chaîne. Dans le cadre des différents travaux de recherche menés sur les tissus 3D interlocks chaînes, nous avons montré les adaptations nécessaires sur la machine à tisser pour réaliser des architectures tissées multicouches. Ces adaptations, sur machine industrielle ou sur machine de prototypage, sont nécessaires pour optimiser les différences de consommation des fils de chaîne de liage et de renfort au sein de l'architecture tissée mais également pour positionner correctement dans l'épaisseur les différents fils de chaîne et trame. Cependant, lors du procédé de tissage et en fonction des paramètres du tissu 3D interlock chaîne, tels que : les densités de fils par centimètre, les titrages de fils, le nombre de couche, le type, le pas et la profondeur de liage; les fils en contact avec les éléments de la machine à tisser en mouvement et les fils en contact entre eux conduisent à une dégradation de leur surface, plus prononcée pour des fils multi-filamentaires faiblement retordus. Ainsi, nous avons pu mesurer, aux différentes zones de la fabrication du tissu 3D interlock chaîne, l'influence des éléments dynamiques de la machine à tisser sur la dégradation des fils; ce qui nous a permis d'adapter ou de modifier les parties provoquant les endommagements.

Le développement de ce thème relatif à l'analyse et l'optimisation du procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaînes a été valorisé scientifiquement par :

- 5 publications [1][17][38][52][85],
- 27 communications [10][11][12][13][14][15][16][30][31][32][33][34][35][36][37][70][71][75][78][79][80][81][82][83][84][92][94],
- 8 thèses soutenues [8][9][39][40][41][42][43][57],
- 8 masters recherches soutenus [58][59][60][61][62][64][65][73],
- 6 rapports internes de recherche [66][67][68][69][72][74],
- 1 thèse de doctorat en cours [76].

## VI. Bibliographie

- [1] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Kinematic Modelling of the Weaving Process applied to 2D fabric," *Journal of Industrial Textiles*, published online 25 April 2014.
- [2] S. Adanur, *Handbook of weaving*.: CRC Press, 2001.
- [3] P.R. Lord and M.H. Mohamed, *weaving, conversion of yarn to fabric*, woodhead publishing, Ed., 1999.
- [4] B. Lee, K.H. Leong, and I. Herszberg, "The effect of weaving on the tensile properties of carbon fibre tows and woven composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 20, pp. 652-670, 2001.
- [5] A. Abu Obaid et al., "Effects of Weaving on S-2 Glass Tensile Strength Distribution (3TEX, Inc.)," in *TEXCOMP 09 Conference*, Delaware, USA, October, 2008, pp. 78-88.
- [6] E.V. Chepelyuk and V.V. Choogin, "Weft friction in weaving machines (in russian)," National technical university, Kehrson, 2008.
- [7] V.V. Choogin, P. Bandara, and E.V. Chepelyuk, "Woven fabric formation: principles and methods," in *Mechanisms of flat weaving technology*.: Woodhead publishing, 2013, pp. 116-121.
- [8] J. Vilfayeau, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," Thèse de doctorat 13/03/2014.
- [9] N. Trifigny, "Mesure in-situ et connaissance des phénomènes mécaniques au sein d'une structure tissée multicouches," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 09/12/2013.
- [10] N. Trifigny et al., "PEDOT:PSS based sensors for in-situ measurement during the composite material weaving process," in *13th AUTEX World Textile Conference*, Dresden, Germany, May 22nd to 24th 2013.
- [11] N. Trifigny et al., "New PEDOT: PSS: NMP /PVA yarn sensors for in measurements of glass fiber 3d interlock fabric during the weaving process," in *4th ITMC International Conference*, Lille, France, 8-10 Octobre 2013.
- [12] V. Koncar, C. Cochrane, M. Lewandowski, F. Boussu, and C. Dufour, "Electro-conductive sensors and heating elements based on conductive polymer composites," *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 21, no. 2/3, pp. 82 - 92, 2009.
- [13] N. Trifigny, F. Boussu, V. Koncar, and D. Soulat, "Dynamic in-situ measurements of 3D Composite material mechanical constraints during the weaving process," in *12th AUTEX world textile conference*, vol. 2, Zadar, Croatia, 13 to 15th June 2012, pp. 1475-1480.
- [14] N. Trifigny, F. Boussu, and V. Koncar, "Dynamic in-situ measurements of 3D composite material mechanical constraints during the weaving process," in *4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion*, Bangkok, Thailand, 3-4 July 2012.
- [15] N. Trifigny, F. Boussu, D. Soulat, and V. Koncar, "Dynamic in-situ measurements of 3D composite material mechanical constraints during the weaving process," in *4th World conference on 3D fabrics and their applications*, Aachen, Germany, September 10th – 12th, 2012.
- [16] N. Trifigny et al., "In-Situ measurements of strain and stress on Glass warp yarn during the weaving of 3d interlock structure with innovative sensors," in *TEXCOMP 11 Conference*, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.



- [17] N. Trifigny et al., "PEDOT:PSS-Based Piezo-Resistive Sensors Applied to Reinforcement Glass Fibres for in Situ Measurement during the Composite Material Weaving Process," *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 10749-10764, 2013.
- [18] Y. Mahadik and S.R. Hallett, "Finite element modelling of tow geometry in 3D woven fabrics," *Composite Part A*, vol. 41, no. 9, pp. 1192-1200, September 2010.
- [19] H. Lin, J. Wang, A.C. Long, M.J. Clifford, and P. Harrison, "Predictive modelling for optimization of textile composite forming," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 15, pp. 3242-3252, 2007, DOI 10.1016/j.compscitech.2007.03.040.
- [20] F. Stig and S. Hallstrom, "Spatial modelling of 3D-woven textiles," *Composite Structure*, vol. 94, no. 5, pp. 1495-1502, April 2012.
- [21] B El Said, S Green, and S Hallett, "Kinematic modelling of 3D woven fabric deformation for structural scale features," *Composite Part A*, vol. 57, pp. 95-107, 2014.
- [22] H. Lin et al., "Multi-scale integrated modelling for high performance flexible materials," *Computational Material Science*, vol. 65, pp. 276-286, 2012.
- [23] P. Badel, E. Vidal-Salle, E. Maire, and P. Boisse, "Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale," *Composite Science and Technology*, vol. 68, no. 12, pp. 2433-2440, September 2008.
- [24] R. Tavana, S.S. Najjar, M.T. Abadi, and M. Sedighi, "Meso/macro-scale finite element model for forming process of woven fabric reinforcements," *Journal of Composite Materials*, vol. 47, no. 17, pp. 2075-2085, August 2013.
- [25] C. Florimond, H. Ramezani-Dana, and E. Vidal-Salle, "Identification of fibre degradation due to friction during the weaving process," *Key Engineering Materials*, vol. 554-557, pp. 416-422, 2013.
- [26] ALTAIR Engineering, "Radioss," theory manual 11.0 2011.
- [27] E. De Luycker, "Simulation et experimentation en mise en forme de renforts composites 3D Interlocks," INSA, Lyon, France, Thèse de Doctorat 2009.
- [28] A. Charmetant, "Approches hyperélastiques pour la modélisation du comportement mécanique de préformes tissées de composites," INSA, Lyon, France, Thèse de doctorat 2011.
- [29] N. Hamila, "Simulation de la mise en forme des renforts composites mono et multi plis," INSA, Lyon, France, Thèse de doctorat 2007.
- [30] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, and P. Boisse, "Influence of weaving process on the 3D woven fabric for composite materials," in *12th AUTEX world textile conference*, vol. 2, Zadar, Croatia, 13 to 15th June 2012, pp. 1785-1790.
- [31] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, and P. Boisse, "Numeric Modelling of the weaving process for Textile composite," in *4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion*, Bangkok, Thailand, 3-4 July 2012.
- [32] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, and P. Boisse, "Numerical modelling and simulation of the weaving process for textile composite applications," in *4th World conference on 3D fabrics and their applications*, Aachen, Germany, September 10th – 12th, 2012.
- [33] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Numerical modelling of the weaving process for textile composite," in *ESAFORM*, Aveiro, Portugal, 22 to 24 April 2013.
- [34] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," in *JNC 18*, Nantes, France, du 12 au 14 juin 2013.
- [35] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Numeric simulation tool of the weaving process," in *International conference Modelling simulation and visualization methods, MSV13*, Las Vegas, USA, 22 to 25 July 2013, pp. 60-63.
- [36] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Numerical approach of the weaving process for textile composite," in *ICCM 19 - 19th International Conference on composite materials*, Montreal, Canada, 28 July to 2 August 2013.
- [37] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Development of a finite element model for the weaving process," in *TEXCOMP 11 Conference*, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [38] J. Vilfayeau, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Numerical modelling of the weaving process for textile composite," *Key Engineering Materials*, vol. 554-557, pp. 472-477, 2013.
- [39] S. Nauman, "Geometrical modelling and characterization of 3D warp interlock composites and their on-line structural health monitoring using flexible textile sensors," University of Lille 1, Lille, Ph-D thesis 24/03/2011.
- [40] P. Lapeyronnie, "Mise en œuvre et comportement mécanique de composites organiques renforcés de structures 3D interlocks," Université de Lille 1, Douai, France, Thèse de doctorat 14/12/2010.
- [41] C. Ha-Minh, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 17/11/2011.
- [42] M. Lefebvre, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 07/12/2011.
- [43] B. Provost, "Étude et Réalisation d'une solution à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 14/01/2013.
- [44] J. Hu, *3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structure.*: Woodhead publishing, 2008, vol. 74.
- [45] (2011, July) 3TEX inc. [Online]. <http://www.3tex.com>
- [46] (2011, July) Shape3. [Online]. [http://shape3.com/Frameset\\_Shape3.htm](http://shape3.com/Frameset_Shape3.htm)
- [47] A.P. Mouritz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, and K.H. Leong, "Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, pp. 1445-1461, 1999.
- [48] S. Rudov-Clark, A.P. Mouritz, L. Lee, and M.K. Bannister, "Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites," *Composites Part A*, vol. 34, pp. 963-970, 2003.
- [49] L. Wagner, Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2006, ch. Introduction, pp. 1-25.
- [50] "Customer acceptance standards - SE 1200 SINGLE END ROVING (Type 30) for Knitting, Weaving and Filament Winding applications Europe," OCV Reinforcements (OWENS CORNING), 2011.
- [51] "Direct Roving Fiber Glass - HYBON 2001 - 900 Tex," PPG Fiber Glass,.
- [52] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Influence of high-performance yarns degradation inside three-dimensional warp interlock



- fabric," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 42, no. 4, pp. 475–488, April 2013.
- [53] S. Goutianos, T. Peijs, B. Nystrom, and M. Skrifvars, "Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications," *Applied Composite Materials*, vol. 13, no. 4, pp. 199–215, June 2006.
- [54] A.J. Rajwin, V. R. Giridev, and M. Renukadevi, "Effect of yarn twist on mechanical properties of glass fibre reinforced composite rods," *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, vol. 37, pp. 343–346, December 2012.
- [55] "Documentation Dornier et Catalogue des pièces de rechange pour Dornier HTVS 4/S," Lindauer Dornier gesellschaft MBH, Documentation technique 2009.
- [56] S. Benltoufa. (2007) Etude de la foule. [Online]. [http://benltoufa.6te.net/contenu/etude\\_de\\_la\\_foule.html](http://benltoufa.6te.net/contenu/etude_de_la_foule.html)
- [57] C. Florimond, "Contributions à la modélisation mécanique du comportement de mèches de renforts tissés à l'aide d'un schéma éléments finis implicite," Université de Lyon, Lyon, France, Thèse de doctorat 29/11/2013.
- [58] G. Bailleul, "Élaboration de matériaux composites à base de tissus métalliques," DUBAR WARNETON, Wasquehal, France, Projet de fin d'études ENSAIT 1999.
- [59] N. Voisin, "Analyse des performances des métiers à tisser," ULSTER CARPET, Londonderry, Irlande, Projet de fin d'études ENSAIT 2000.
- [60] B. Draoui, "Etude de matériaux composites à base d'un tissé en alliages à mémoire de forme - Tests d'amortissement," ONERA, Lille, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2002.
- [61] B. Everaert, "Mise au point d'un tissu technique moulable à base de Twintex," SAINT GOBAIN - VETROTEX, Chambéry, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2003.
- [62] B. Degasnes, "Réalisation d'un tissu intégrant un circuit électrique à vocation chauffante (intégrable dans un gant)," EMT, Lyon, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2007.
- [63] ARM. (2014, May) Machine à tisser prototype ARM. [Online]. <http://www.arm-loom.ch/franz/home.htm>
- [64] V. Begus, "Nouvelle solution textile pour composite anti-balistique," ENSAIT, Roubaix, France, Master E-team 2006.
- [65] C. Lorin, "Tissage 3D : Intégration de lisières et développement de préformes spécifiques," Groupe CTT, Saint Hyacinthe, Canada, Projet de fin d'études ENSAIT 2012.
- [66] F. Boussu, F. Veyet, and N. Dumont, "Développement d'une machine prototype de tissage pour la réalisation d'échantillons textile 2,5D," OSEO, Lille, France, Projet privé A0807017N, 03/11/2008 - 03/05/2009.
- [67] F. Boussu and C. Dufour, "Modification of the loom devices," ENSAIT, Roubaix, France, Milestone MS5 - WP3 Development of 3D shape preforms in one step for panels and stiffeners at pilot scale Project IP7, MAPICC 3D, 24/02/2014.
- [68] F. Boussu and C. Dufour, "Samples and report about the characterization of 3D preforms obtained by the demonstrator," ENSAIT, Roubaix, France, Deliverable 3.13 - WP3 Development of 3D shape preforms in one step for panels and stiffeners at pilot scale Project IP7 MAPICC 3D, 25/01/2013.
- [69] C. Dufour and F. Boussu, "Report about the performances and limits of demonstrator for a 3D preform, plan for scale up and optimization," ENSAIT, Roubaix, France, Deliverable 3.15 - WP3 Development of 3D shape preforms in one step for panels and stiffeners at pilot scale IP7 MAPICC 3D, 28/02/2014.
- [70] A. Serret, "Amélioration de la résistance au dépliage d'une cornière composite (Carbone/Epoxy)," AIRBUS, Toulouse, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2007.
- [71] A. Lecas, "Nouvelle technologie de structuration textile pour pièce aéronautique," AIRCELLE - groupe SAFRAN, Le Havre, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2010.
- [72] F. Boussu, N. Trifigny, A. Lecas, and X. Legrand, "Réalisation d'échantillons pour pièce de type corps de poutre en composite textile," AIRCELLE - Groupe SAFRAN, Le Havre, France, Projet privé du 01/09/2010 au 31/12/2010.
- [73] C. Dufour, "Faisabilité de la préforme de rail de poutre RTM," AIRCELLE - Groupe SAFRAN, Le Havre, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2012.
- [74] F. Boussu et al., "Solution nouvelle de protection balistique à base Nano Tube de Carbone et Textile," DGA, Bagneux, France, Projet privé REI-DGA, SNETex, 01/09/2009 - 01/06/2012.
- [75] F. Veyet et al., "Optimized weaving process fitted to 100% carbon nano-tube multi-filaments yarns," in *12th AUTEX world textile conference*, Zadar, Croatia, 13 to 15th June 2012, pp. 349-354.
- [76] C. Dufour, "Conception et optimisation des structures tissées interlocks pour optimisation de la mise en forme 3D des renforts fibreux de matériau composite," Université de Lille 1, Villeneuve d'ascq, France, Thèse de doctorat début de la thèse 01/09/2012.
- [77] TEIJIN Corporation, "Ballistic yarns and fabrics, TWARON™ the power of Aramid," Product datasheet June 2004.
- [78] F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Measurement of high performance yarns properties inside fabrics," in *2ème congrès international de la recherche appliquée en Textile (CIRAT2)*, Monastir, Tunisie, 30 novembre – 2 décembre 2006.
- [79] F. Boussu, X. Legrand, S. Nauman, and P. Bruniaux, "Comparison of the geometrical and mechanical models used for the textile composite structures," in *International conference CORTEP*, vol. 1, Iasi, Romania, 18 au 21 octobre 2007, pp. 21 – 30.
- [80] F. Boussu, X. Legrand, S. Nauman, and V. Koncar, "Geometric modelling of 3D angle interlock fabrics," in *Autex 08, World Textile Conference*, Biella, Italie, June 24-26, 2008.
- [81] S. Nauman, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Geometrical modelling of 3D textile composite application to warp interlock carbon fabrics," in *13th European Conference on Composite Materials*, Stockholm, Sweden, June 2 - 5, 2008.
- [82] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Weaving of 3D interlock layer to layer carbon-glass reinforcement on a conventional loom," in *2nd international Conference on textile and Clothing*, Lahore, Pakistan, 4-5 March 2009.
- [83] F. Boussu, I. Cristian, and S. Nauman, "Technical performance of yarns inside a 3D woven fabric," in *ITC International Conference on Latest Advancements in High Tech Textiles and Textile-based Materials*, Gent, Belgium, 23-25 September 2009, pp. 142-149.
- [84] F. Boussu, I. Cristian, S. Nauman, P. Lapeyronnie, and C. Binetruy, "Effect of 3D-weave architecture on strength transfer from tow to textile composite," in *2nd World conference on 3D Fabrics and their applications*, Greenville, South Carolina, USA, 6-7 avril 2009.
- [85] I. Cristian, S. Nauman, F. Boussu, and V. Koncar, "A study of strength transfer from tow to textile composite using different reinforcement architectures," *Applied Composite Materials*, vol. 19, no. 3-4, pp. 427-442, 2012.

- [86] B.N. Cox and M.S. Dadkhah, "The macroscopic elasticity of 3D woven composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, pp. 785-819, 1995.
- [87] B.N. Cox, M.S. Dadkhah, and W.L. Morris, "On the tensile failure of 3D woven composites," *Composites Part A*, vol. 27, pp. 447-458, 1996.
- [88] S. John, I. Herszberg, and F. Coman, "Longitudinal and transverse damage taxonomy in woven composite components," *Composites Part B*, vol. 32, pp. 659-668, 2001.
- [89] L. Lee, S. Rudov-Clark, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, and I. Herszberg, "Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites," *Composite Structures*, vol. 57, pp. 405-413, 2002.
- [90] N.K. Naik, S.N.M. Azad, and P.D. Prasad, "Stress and Failure Analysis of 3D Angle Interlock Woven Composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 36, pp. 93-123, January 2002.
- [91] S.D. Rudov-Clark, "Experimental Investigation of the tensile properties and failure mechanism of three-dimensional woven composites," RMIT University - School of Aerospace Mechanical and Manufacturing Engineering, Melbourne, Australia, Phd thesis 2007.
- [92] S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, and V. Koncar, "Impact of 3D woven structure onto the high performance yarn properties," in *Second Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation, Textile Composites Workshop*, Casablanca, Morocco, November 2009 the 12 – 14th.
- [93] E. Archer, S. Buchanan, A.T. McIlhagger, and J.P. Quinn, "The effect of 3D weaving and consolidation on carbon fiber tows, fabrics, and composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, pp. 3162-3170, 2010.
- [94] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Degradation measurement of fibrous reinforcement inside composite material," in *ICCE-19: 19th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering*, Shanghai, China, July 24-30, 2011.
- [95] AFNOR, "Textiles - Fils sur enroulements - Détermination de la force de rupture et de l'allongement à la rupture des fils individuels à l'aide d'un appareil d'essai à vitesse constante d'allongement," AFNOR, Norme NF EN ISO 2062, Janvier 2010.

## Thème 4. Comportement à l'impact des structures textiles souples

Le quatrième thème se focalise sur les solutions de protection souple à l'impact, notamment en définissant les modes de déformation dynamique des structures textiles. Un modèle numérique multi-échelles, macroscopique et mésoscopique, de tissu 2D a permis de simuler l'influence de différents paramètres de fils sur la performance balistique des structures tissées. Différents travaux de recherche expérimentaux d'impacts sur des tissus 3D interlock chaîne ont permis de révéler l'influence sur la performance balistique de certains paramètres du tissu; notamment l'homogénéité des valeurs de densité des fils de chaîne et trame, le nombre de couches du tissu 3D interlock chaîne et les titrages de fils de chaîne et trame.

Sur la base de cette compréhension du modèle de comportement à l'impact des structures textiles souples, trois solutions différentes ont été proposées pour répondre aux besoins de protection des gilets pare-balles sous aux impacts de différentes munitions à des vitesses variées.

### Sommaire

I.	Introduction .....	87
II.	Modèle de comportement à l'impact d'un tissu souple .....	87
A.	Caractérisation dynamique d'un fil .....	88
B.	Paramètres influents sur le comportement à l'impact d'un tissu .....	90
1.	Influence de la vitesse d'impact .....	90
2.	Influence de la géométrie du projectile .....	90
3.	Influence de l'angle d'impact du projectile sur la cible .....	91
4.	Influence de la géométrie du tissu .....	91
5.	Influence du mode de fixation du tissu .....	91
C.	Description du comportement dynamique d'un tissu à l'impact .....	92
D.	Influence des caractéristiques mécaniques du fil lors d'un impact balistique .....	95
1.	Influence du coefficient de Poisson $\nu_{12}$ .....	96
2.	Influence module d'Young transversal $E_{22}$ .....	97
3.	Influence du module de cisaillement $G_{12}$ .....	98
4.	Influence du frottement des fils .....	98
5.	Influence de la géométrie du tissu .....	99
E.	Études expérimentales sur le comportement à l'impact de tissu 3D interlock chaîne .....	100
F.	Conclusion sur le modèle du comportement à l'impact .....	106
III.	Solutions de protection souple à l'impact .....	107
A.	Gilet pare balles intégrant des fils à mémoire de forme.....	107
B.	Gilet pare balles intégrant des hybridations de structures textiles. ....	108
C.	Gilet pare-balles adapté à la morphologie féminine .....	110
D.	Conclusion sur les solutions de protection souple à l'impact .....	111
IV.	Synthèse .....	112
V.	Bibliographie .....	112

## I. Introduction

L'objectif général de ce thème consiste à mieux comprendre le mode de comportement à l'impact des structures textiles et à identifier les paramètres produits qui influent sur la performance balistique de la solution de protection. Sur la base de cette connaissance, acquise par analyse des paramètres influents lors de simulations à l'impact d'un modèle de tissu ou par des expérimentations sur différentes configurations de structures textiles hybrides soumises également à l'impact, nous pouvons identifier des solutions de protection souple correspondant aux différents besoins d'utilisation et face aux diverses vitesses de projectiles. Les applications de protection souple présentées dans ce thème s'orientent principalement sur des gilets pare-balles, pouvant s'adapter à la morphologie du corps humain, notamment la partie supérieure comprenant l'ensemble des organes vitaux tels que : l'appareil digestif, l'appareil respiratoire et le système de circulation sanguine. Cette adaptation est nécessaire pour assurer un contact permanent entre la solution de protection souple et la partie supérieure du corps humain, permettant ainsi de se déformer lors d'un impact et d'absorber l'énergie d'impact sans provoquer de perforation du gilet pare-balles.

## II. Modèle de comportement à l'impact d'un tissu souple

De nombreuses études [1][2][3][4][5][6][7] ont montré l'intérêt des structures tissées 3D interlocks chaines en tant que renfort fibreux d'un matériau composite permettant d'apporter une meilleure réponse à l'impact que les structures non liées dans l'épaisseur, notamment les tissus 2D laminés. En effet, lors d'un impact sur un matériau composite, le mode de comportement dynamique de la structure fibreuse est fortement dépendant de la vitesse initiale du projectile. Lorsque la vitesse de déformation du matériau est très largement supérieure à sa capacité de réaction pour un temps de sollicitation très court, le tissu n'apporte quasiment aucune résistance face au projectile et un mode de rupture de type cisaillement dans l'épaisseur se produit, ne modifiant que très légèrement la vitesse initiale du projectile. Cette limite d'utilisation du matériau fibreux au sein d'un matériau composite soumis à un impact semble difficile à estimer en raison du nombre de paramètres différents et indépendants, agissant sur sa capacité de résistance, tels que : la forme et vitesse du projectile, le type de structure fibreuse (géométrie), le type et la nature des fils (matière première, titrage, torsion) et le type d'imprégnation du matériau composite. Aussi, pour comprendre l'influence de chacun de ces paramètres sur le comportement dynamique à l'impact du matériau composite, nous avons décomposé le mode de rupture complexe du tissu 3D interlock chaîne à différentes échelles. Dans le cadre des travaux de recherche de Ha-Minh [8], de Provost [9], de Lefebvre [10], mais aussi ceux en cours de Chevalier [11], nous avons pu observer respectivement le mode déformation d'un fil soumis à des sollicitations dynamiques proches des conditions réelles lors de l'impact, puis d'un tissu 2D et enfin d'un tissu 3D interlock chaîne.

Initialement, la théorie d'un impact sur un fil a été étudiée par Stone en 1955 telle que mentionnée dans les travaux de Chocron et al. [12]. A partir de leurs résultats expérimentaux d'essais balistiques [13], Smith et al. [14] ont construit un modèle analytique pour décrire la réponse d'un fil sous un impact transversal.

Ce modèle considère qu'à l'instant où le projectile heurte un fil avec une vitesse initiale constante  $V_i$ , deux ondes de déformation sont créées et se propagent à partir du point d'impact : l'une longitudinale et l'autre transversale (Figure 94).

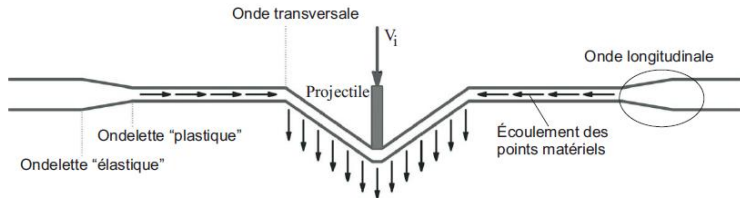


Figure 94. Propagation des ondes de déformation dans un fil soumis à un impact transversal [13].

L'onde longitudinale aux bords du fil produit deux ondelettes, dont une dite "élastique" pour la déformation  $\varepsilon = 0$  avec une vitesse de déplacement  $C_e$  et l'autre dite "plastique" pour la déformation  $\varepsilon = \varepsilon_p$  générée lors de l'impact avec une vitesse de déplacement  $C_p$ , telles que :

$$\text{Équation 5} \quad C_e = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0}}$$

$$\text{Équation 6} \quad C_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=\varepsilon_p}}$$

Où  $\sigma$  et  $\varepsilon$  sont respectivement, la contrainte et la déformation du fil en traction et  $\rho$  sa masse volumique.

Pour un fil considéré comme infini en longueur, le fil n'est pas déformé jusqu'à l'ondelette "élastique", puis entre l'ondelette "élastique" et l'ondelette "plastique", la déformation du fil varie de 0 à  $\varepsilon_p$ , et enfin la déformation du fil reste constante et égale à  $\varepsilon_p$  juste après le début de l'ondelette "plastique".

Quand l'onde longitudinale arrive à une certaine position, les points matériels sont dirigés vers le point d'impact, avec une vitesse  $W$ :

$$\text{Équation 7} \quad W = \int_0^{\varepsilon_p} \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}} d\varepsilon$$

Cet écoulement est toujours dans le sillage du front de l'ondelette "plastique". Il entre dans l'onde transversale qui se propage à la vitesse  $U$  [14] :

$$\text{Équation 8} \quad U = \sqrt{\frac{\sigma_p}{\rho(1+\varepsilon_p)}}$$

Où  $\rho$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\sigma_p$  sont respectivement la masse volumique, les limites élastiques de déformation et de contrainte du fil. Le déplacement de cette onde conduit au développement d'une pyramide (Figure 95). Dans cette pyramide, les points matériels ne se déplacent que dans la direction transversale, et ont par conséquent une vitesse  $V_i$  identique à celle du projectile.



Figure 95. Configuration du fil chaque  $40 \times 10^{-6}$  s du fil élastique après un impact transversal de 180 m/s avec la propagation de l'onde longitudinale (flèche) et le déplacement des points matériels (espaces entre les tirés) [14].

Le matériau dans la zone limitée par l'onde transversale (la pyramide de la Figure 95) se déplace avec la vitesse du projectile  $V_i$  :

$$\text{Équation 9} \quad V_i = \sqrt{(1 + \varepsilon_p)^2 U^2 - [(1 + \varepsilon_p)U - W]^2}$$

Dans le cas particulier où le fil est un matériau élastique caractérisé par un module d'Young  $E$ , les ondes élastiques et plastiques se propagent avec une même vitesse  $C$  :

$$\text{Équation 10} \quad C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

La valeur du module de Young apparaît alors comme l'élément déterminant dans la définition de la vitesse de propagation des ondes. Cependant, pour refléter au mieux le comportement dynamique du fil lors d'un impact balistique, il est préférable de mesurer cette valeur de façon dynamique. Ainsi, nous avons pu conduire différents travaux de recherche pour identifier la valeur dynamique du module de Young d'un fil, considéré comme un matériau élastique.

## A. Caractérisation dynamique d'un fil

Dans le cadre des travaux de Rodriguez et al. [15], la mesure de l'allongement dynamique d'un fil sur barre Hopkinson a été validée pour des fils de para-aramide et de polyéthylène. La courbe de traction/allongement dynamique apparaît plus linéaire que celle mesurée statiquement et révèle une plus grande variation de l'allongement de la fibre de polyéthylène que de la fibre de para-aramide, ainsi qu'un mode de comportement à la rupture clairement différent. En complément, dans l'étude de Dabboussi et al. [16], un équipement spécifique d'attache des fils à base de multi-filaments a été utilisé, notamment sur des fils de para-aramide de type Kevlar KM2, pour mesurer l'allongement dynamique sur barre Hopkinson permettant de fiabiliser les mesures dynamiques obtenues, et comparées par la suite avec des tests quasi-statiques sur système de mesure à vérin hydraulique pour mettre en évidence l'influence du taux de déformation dynamique sur la résistance du fil multi-filaments.

Ainsi, nous avons également effectué des travaux similaires dans le cadre des travaux de Guillot [17], où des essais de traction sur fil ont été réalisés à l'ONERA (Lille) en utilisant un système de vérin rapide Schenk de 50 kN, à mouvement dynamique permettant d'atteindre une vitesse de 1 m/s. Un ensemble de 10 tests, pour chaque vitesse, a été effectué sur un fil polyéthylène haut module Dyneema SK75 (1760 dTex, sans torsion) et les valeurs obtenues pour 5 mm/min ( $0,083 \times 10^{-3}$  m/s), 500 mm/min ( $8,33 \times 10^{-3}$  m/s) et pour 1 m/s sont respectivement (Tableau 19) :

Tableau 19. Tests de tractions à différentes vitesses sur fil polyéthylène haut module Dyneema SK75, 1760 dTex sans torsion.

vitesse (m/s)	contrainte max (GPa)	Allongement (%)	module de Young (GPa)
$0,083 \times 10^{-3}$	2,635	8,3	61,8
$8,33 \times 10^{-3}$	2,679	9	69,7
1	2,944	6,6	71

Les résultats obtenus montrent une augmentation du module de Young pour des vitesses de traction rapide plus élevées, cependant le système de maintien du fil lors de ces essais n'a pas pu être adapté au fil multi-filaments non retordu; ce qui a provoqué des glissements au niveau des mors. De plus, les vibrations engendrées lors du mouvement dynamique du vérin rapide ont provoqué de nombreuses perturbations dans le système de mesure; ce qui ne nous a conduit à ne pas poursuivre avec ce type de matériel non adapté à la dimension d'un fil.

Afin de mesurer le comportement dynamique en traction d'un fil, nous avons développé un premier prototype de mesure dynamique dans le cadre des travaux de Cuong [8] au même moment que celui proposé par Lotpanikov [18]. Le principe de mesure dynamique repose sur un outil appelé "Split Flying Bar" (SFB), composé d'un sabot (pièce 2 - Figure 96 gauche) sur lequel est fixé une extrémité d'un fil (pièce 3 - Figure 96 gauche) et d'un projectile associé de diamètre inférieur au sabot (pièce 4 - Figure 96 gauche) sur lequel l'autre extrémité du fil est attaché (pièce 1 - Figure 96 gauche). Le dispositif SFB est inséré dans le tube du canon pneumatique et le sabot est éjecté à une vitesse initiale donnée (Figure 96 - droite (a)) sous l'effet



de la pression incidente, puis le sabot vient en butée sur les parties fixes de l'intérieur du tube (Figure 96 - droite (b)) pour éjecter le projectile du sabot et permettre la mise en tension dynamique du fil. Un dispositif de mesure dynamique du déplacement du projectile jusqu'à la rupture du fil est assuré par le biais d'une caméra rapide couplée à des mesures par laser [19].

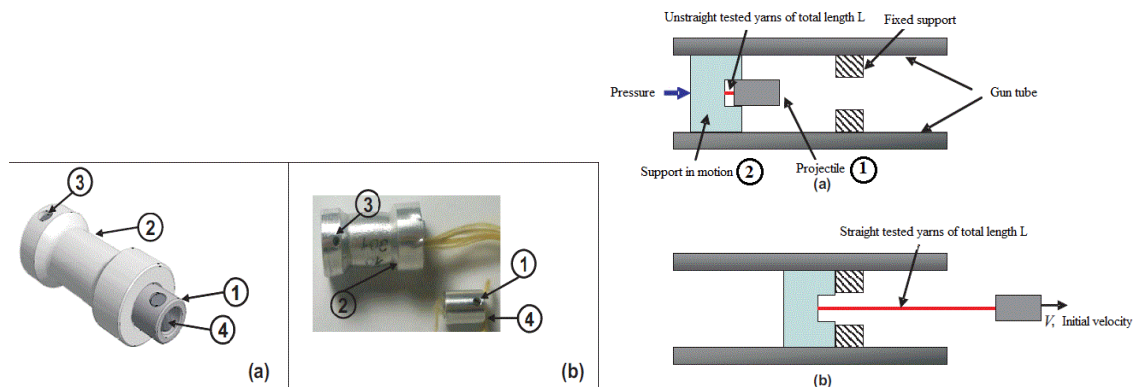


Figure 96. (gauche) description du dispositif de mesure dynamique d'un fil "Split Flying Bar" (SFB) - (droite) principe de fonctionnement du SFB.

En parallèle, des essais dynamiques sur un fil para-aramide Kevlar 129 - 3300 dTex, différents essais de traction à vitesse quasi-statique ( $500 \text{ mm/minute} = (8,33 \times 10^{-3} \text{ m/s})$ ) ont été réalisés suivant la norme ASTM D885-03 sur une machine Instron 8501 [8] (Tableau 20).

Tableau 20. Comparaison des mesures statiques et dynamiques sur fil Kevlar 129 - 3300 dTex.

Mode de sollicitation ( $\dot{\epsilon}$ )	fréquence de	Module longitudinal ( $E$ ) en GPa	Allongement à rupture ( $\epsilon_R$ ) en %	Énergie de contrainte à rupture ( $W$ ) en $\text{J/cm}^3$
Statique ( $0,03 \text{ s}^{-1}$ )		69,1 ( $\pm 3,8\%$ )	3,7 ( $\pm 1,4\%$ )	46,8
Dynamique ( $225 \text{ s}^{-1}$ )		214,6 ( $\pm 28 \%$ )	2,2 ( $\pm 14\%$ )	49,8

En mode dynamique, la rupture du fil est plus rapide en raison de l'augmentation significative du module comparé à la valeur mesurée en mode statique pour une même consommation d'énergie de contrainte à rupture dans les cas statique et dynamique. Ces premières mesures de la mise en tension dynamique du fil ont permis de d'utiliser la valeur dynamique du module de Young résultant dans les simulations d'un tissu soumis à un impact balistique et a ainsi amélioré la précision de comportement du tissu simulé en comparaison avec les résultats observés sur tissu réel [20].

Cependant, le premier prototype de mesure dynamique SFB n'a pas permis d'augmenter la vitesse de sollicitation du fil de façon significative pour se rapprocher des conditions réelles de sollicitation lors d'un impact balistique sur fil [21]. C'est pourquoi, dans le cadre des travaux de recherche en cours de Chevalier [11], nous avons apporté des améliorations au système de mesure dynamique du fil SFB [22]. Nous avons repris le même système de mors par serrage du fil que celui développé par Chocron et al. [23] et amélioré par Shim et al. [24] pour éviter un écrasement localisé au point du maintien du fil et éviter ainsi une rupture du fil par cisaillement transverse.

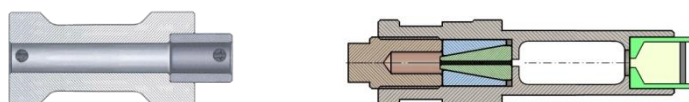


Figure 97. Évolution du système de mesure dynamique du fil SFB (gauche) version initiale - (droite) version finale.

Cette amélioration du système de mesure dynamique du fil nous a permis de réduire la masse du projectile ce qui nous permet d'augmenter la vitesse de sollicitation du fil, d'assurer le maintien du fil dans les mors pour éviter son glissement et enfin de mettre en tension initialement le fil pour éviter des effets vibratoires du fil lors de sa mise en tension dynamique. Nous avons ainsi pu observer, par le biais de la caméra rapide, la mise en tension dynamique d'un fil jusqu'à rupture en utilisant le système de mesure dynamique SFB amélioré (Figure 98) [25].

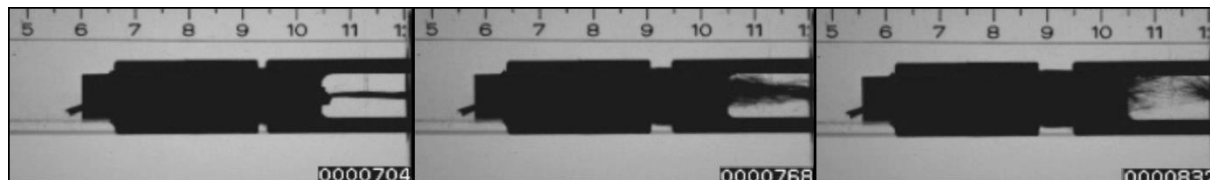


Figure 98. Observations par caméra rapide de la rupture dynamique du fil par SFB amélioré à 35 m/s.

Fort de cette connaissance sur le comportement dynamique des fils et les systèmes de mesures associés, nous avons poursuivi nos travaux de recherche pour comprendre le comportement dynamique d'un tissu lors d'un impact.

## B. Paramètres influents sur le comportement à l'impact d'un tissu

De façon générale, la réponse d'un tissu soumis à l'impact peut être assimilée à la combinaison de phénomènes s'opérant à différentes échelles:

- une réponse globale à l'échelle mésoscopique, dépendant fortement de la dimension de la cible, concerne le transfert de l'onde de déformation et la formation du cône (Figure 99 gauche),
- une réponse locale à l'échelle macroscopique est caractérisée par les mécanismes de rupture : ruptures en traction et en cisaillement par poinçonnement (shear plugging) des fils (Figure 99 droite).

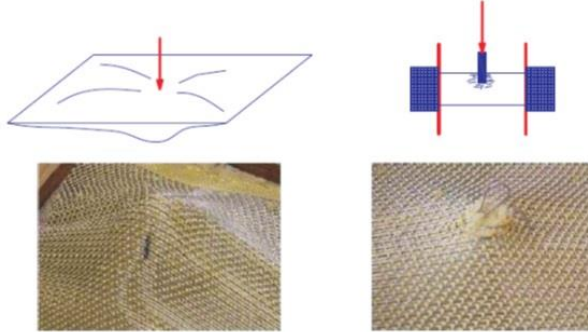


Figure 99. Réponses d'un tissu soumis à l'impact d'un projectile : (gauche) globale et (droite) locale [26][27].

La contribution de chacune de ces réponses est déterminée par plusieurs paramètres : vitesse d'impact, propriétés du projectile et de la cible, les conditions limites (angle d'impact, méthode de fixation de la cible, température, humidité de l'air). Différents travaux de recherche ont permis de comprendre l'influence de ces paramètres sur le comportement à l'impact d'un tissu.

### 1. Influence de la vitesse d'impact

En premier lieu, la vitesse d'impact peut être utilisée comme un facteur prédominant pour connaître le comportement d'un tissu à l'impact et sa capacité d'absorption de l'énergie cinétique résultante [28]. Une classification des vitesses d'impact et des modes de comportement du matériau associé a été proposée par Zukas [29] et a permis de distinguer quatre gammes principales de vitesses (0 à 250 m/s; 250 à 1200 m/s; 1200 à 10000 m/s; 1 à 10 km/s). L'impact balistique dit conventionnel est classé [30] selon des vitesses comprises entre 100 et 1000 m/s pour des munitions répertoriées [26] selon différentes normes internationales NIJ 0101-06:2008 [31], ASTM F1233-08:2008 [32], MIL-STD-662F:1997 [33], NATO STANAG 2920 [34]. D'une façon générale, le suivi de l'impact est assuré par deux techniques expérimentales : caméra ultra-rapide et Laser Doppler [35]. Dans le cadre des travaux de Starrat et al. [36], la conception d'un système de mesure, en continue par laser, du déplacement du projectile a permis de fournir des informations précises sur le mécanisme de déformation des structures textiles lors d'un impact balistique.

Aux vitesses d'impact inférieures à 250 m/s, la pénétration est généralement couplée à la dynamique structurelle globale de la cible et les réponses sont de l'ordre de 1 ms. Avec une augmentation de la vitesse d'impact de 500 à 2000 m/s, le comportement local de la cible est principalement dominé par le comportement du matériau dont la zone s'étend sur une surface équivalente à environ 2 à 3 fois la taille du diamètre du projectile au centre de l'impact. En considérant des gammes de vitesse de l'ordre de 2000 à 3000 m/s, les hautes pressions impliquées permettent aux matériaux d'être modélisés comme des fluides aux premiers instants de l'impact. Aux vitesses supérieures à 10000 m/s, l'échange d'énergie se produit à un taux si élevé que certains des éléments en collision se vaporise sous la forme d'un nuage de débris [37].

Cependant, d'autres auteurs ont considéré d'autres facteurs pour prédire la nature du comportement à l'impact [26] tels que : le rapport des masses projectile/cible, le rapport entre la fréquence du contact local et la fréquence propre de la cible. La distinction entre les différents phénomènes d'impact sur tissu peut être faite par la nature du matériau impactée, la vitesse et la géométrie du projectile et l'environnement du système d'impact.

### 2. Influence de la géométrie du projectile

Selon Shahkarami et al. [26], à faible vitesse, les projectiles pointus décélèrent plus rapidement que dans les cas à grande vitesse (Figure 100). La décélération est plus forte pour les projectiles à tête plate. Les projectiles à tête plate ont tendance à trancher les fibres par leurs arêtes, tandis que les projectiles à tête hémisphérique génèrent essentiellement une rupture en traction pour les fils. L'énergie cinétique des projectiles à tête hémisphérique est d'avantage absorbée par les tissus. Les têtes coniques et les ogives sont capables d'écarter les fils et de traverser le tissu [38]. L'effet de la forme des projectiles diminue quand l'épaisseur ou le nombre de couches des tissus augmente [26]. Une étude similaire a également mis en évidence l'influence de la géométrie du projectile, notamment à têtes plates et pointues, sur les valeurs de profondeur et de diamètre du cratère résultant des cibles en plastiline positionnées en face arrière des tissus de protection lors des impacts balistiques [39]. Un modèle numérique a permis de mesurer l'influence de la géométrie du projectile, pour une vitesse donnée, sur deux endroits types d'un tissu : en dehors et au dehors du point d'entrecroisement des fils de chaîne et trame [40].

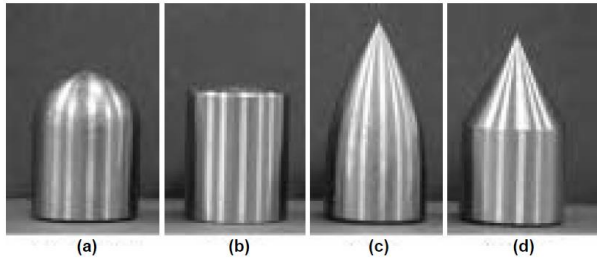


Figure 100. Représentation des différentes formes de projectile : (a) hémisphérique; (b) plate; (c) ogivale; (d) conique [26].

### 3. Influence de l'angle d'impact du projectile sur la cible

Dans les situations réelles de tirs, les cibles sont impactées avec un angle non nul par rapport à la normale au plan du tissu, ce qui se traduit par une déformation transversale asymétrique de la cible [41]. Des tirs obliques effectués sur des composites à base de laminés de para-aramide ont montré une valeur d'angle de ricochet plus importante ( $75^\circ$  et plus) que sur des plaques métalliques ( $60^\circ$ ). De plus, la trajectoire du projectile a été déviée au cours de la pénétration entre les couches du laminé, ce qui a conduit à une consommation d'énergie du projectile par glissement entre couches et à un changement de direction [42]. Un modèle analytique de comportement à l'impact d'une cible composite soumis à des tirs obliques, validé expérimentalement (avec une erreur de 4,07%) et fondé uniquement sur le poinçonnement ("shear plugging") comme mode de dégradation principal, a révélé des variations de vitesse du projectile en fonction de l'angle d'inclinaison pour des épaisseurs de laminés de 4 mm [43].

### 4. Influence de la géométrie du tissu

Les structures tissées équilibrées en nombre de points de liage dans les deux directions du tissu possèdent une performance balistique supérieure aux structures asymétriques en nombre de points de liage [44]. Une géométrie asymétrique donne lieu à un développement inégal des ondes transversales et longitudinales dans la cible, ce qui réduit le nombre de fils impliqués dans l'absorption de l'énergie d'impact. Des tissus d'armure toile, mono et multi-couches, ont révélé de meilleures performances à l'impact si les valeurs de l'ondulation des fils dans les deux directions du tissu, respectivement l'embuvage et le retrait, sont identiques [45]. Plus précisément, un angle de contact élevé, entre les fils de chaîne et trame aux points de liage, couplé à de fortes valeurs d'embuvage et de retrait, conduisent à de meilleures performances des tissus soumis à l'impact d'une bille en acier (10 mm de diamètre, masse de 10g) à 300 m/s [46], ce qui semble indiquer qu'un nombre d'ondulations des fils plus important apporte plus de résistance à l'impact. Nous étudierons par la suite, dans le thème 5, l'influence de l'armure d'un tissu résiné ainsi que l'architecture d'une structure tissée 3D interlock chaîne, en tant que renfort fibreux d'un composite, sur la capacité d'absorption d'énergie lors d'un impact.

La dimension du tissu joue un faible rôle dans l'absorption d'énergie pour les vitesses élevées car la réponse locale du tissu est dominante à haute vitesse. Cependant, Cuniff [44] a conclu que la dimension du tissu a une influence considérable pour des vitesses proches de V50 (la probabilité estimée de perforation est de 0,5) [47][48]. Pour sa part, il estime également que l'énergie spécifique d'absorption du tissu diminue quand le nombre des couches augmente. Pourtant, Lim et al. [49] ont indiqué que cette conclusion est seulement valable pour le cas d'un projectile à tête plane. D'après les travaux de Shahkarami et al. [26], Prosser [50] a démontré une relation linéaire entre le carré de la vitesse limite (V50) et le nombre de couches de tissu; à condition que les mécanismes d'absorption soient similaires.

Des essais d'impact avec des projectiles cylindriques métalliques, présentant des variations de caractéristiques géométriques (deux diamètres et trois formes de pointe différentes), sur différentes épaisseurs de structures composites à base de laminés de verre ont également montré des relations bilinéaires entre l'énergie d'impact et l'épaisseur de la cible [51]. Il ressort de cette étude que les structures composites à base de laminés de verre E de faible épaisseur semblent présenter un mode d'absorption d'énergie indépendant de la géométrie du projectile.

### 5. Influence du mode de fixation du tissu

La fixation du tissu sur seulement les deux côtés opposés contribue à une augmentation de l'énergie d'impact (de 25% à 60%) par rapport à un mode de fixation sur les quatre côtés, en raison de la réduction de la réflexion des ondes de déformation du tissu et de l'augmentation des frottements entre les fils [52]. Dans une étude similaire [53], en appliquant deux forces de maintien de 2 kN et 406 kN sur le système de fixation lors d'un impact d'une masse rigide de 12,3 kg à une vitesse de 3,78 m/s sur un matériau composite renforcé de 5 plis de tissus de polyéthylène (Spectra 900) et imprégnés de résine vinyl-ester, l'énergie absorbée s'avère être 4,5 fois plus élevée dans le cas d'une force de maintien de 2 kN que de 406 kN.

Le modèle d'absorption d'énergie appliqué à un tissu de para-aramide soumis à l'impact balistique révèle également une influence forte du glissement des fils du système de fixation sur le comportement global et la déformation du tissu [54]. Dans une étude plus complète sur des systèmes de fixation de formes rectangulaires, circulaires et hexagonales et en prise sur les 4 côtés, puis sur les quatre coins, et ensuite sur les 2 côtés; les tests à l'impact ont révélé des déformations sous forme d'ogive aux quatre coins du système de fixation ce qui a conduit à des mécanismes de rupture différents sous 3 vitesses d'impact [55]. De façon similaire, des tissus fixés uniquement sur deux côtés au lieu des quatre avec les fils de chaîne et trame parallèles aux bords du système de fixation ont montré une capacité d'absorption d'énergie lors d'impact à haute vitesse. Une orientation du tissu à  $45^\circ$ , dans le système de fixation de forme rectangulaire, a permis l'alignement des fils primaires dans l'axe de la diagonale du système de fixation ce qui a contribué à l'augmentation de l'absorption d'énergie de la structure tissée [56].

En se fondant sur toutes ces expériences relatives à l'influence du mode de fixation sur la capacité d'absorption d'énergie du tissu à l'impact, nous avons développé des cadres métalliques spécifiques adaptés aux tissus 3D interlocks chaines pour limiter l'influence du glissement du tissu lors des essais d'impact effectués en collaboration avec l'École Royale Militaire (ERM) de Bruxelles, l'Institut Saint Louis (ISL) et le Banc Officiel d'Essais (BOE) de Saint Etienne.

Ainsi, dans le cadre de notre étude [57] sur le mode de comportement à l'impact d'un tissu 3D interlock chaîne soumis à différentes vitesses d'impact [58] d'une bille d'acier de 8 mm de diamètre et de masse de 10 g [59], nous avons inséré des cylindres métalliques de diamètre égal à environ 4 fois l'épaisseur du tissu permettant d'éviter le glissement du tissu dans les mors du système de serrage et d'appliquer une pré-tension du tissu répartie de façon équilibrée sur l'ensemble de la structure tissée (Figure 101).

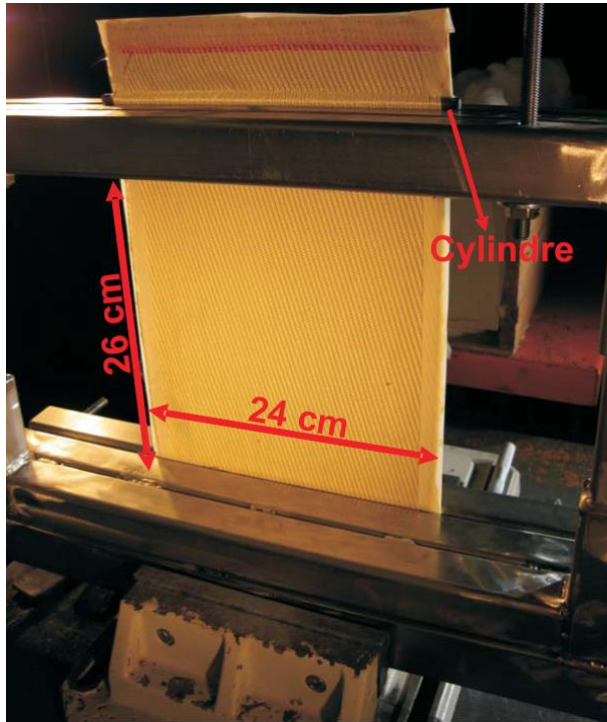


Figure 101. Mode de fixation spécifique sur les deux côtés opposés dans la direction des fils de chaîne d'un tissu 3D interlock chaîne.

En considérant l'ensemble de ces connaissances sur le système d'impact et leurs influences respectives, nous avons pu étudier le mode de comportement à l'impact d'un tissu afin d'en comprendre les mécanismes d'endommagement ainsi que l'influence des paramètres propres de la structure tissée sur son mode de déformation dynamique.

### C. Description du comportement dynamique d'un tissu à l'impact

Les mécanismes d'endommagement d'un tissu 2D seul soumis à l'impact balistique peuvent se décomposer en deux étapes successives et inter-dépendantes [45] (Figure 102) :

- Les fils primaires, en contact direct avec le projectile, forment une croix dans les directions chaîne et trame du tissu.
- Les fils primaires transmettent une partie de leur déformation aux fils secondaires, en non contact direct avec le projectile, par l'intermédiaire des points d'entrecroisement entre les fils de chaîne et trame. C'est ce mécanisme qui crée un cône ou une pyramide de déformation sur le tissu. Simultanément, les ondes de réflexion apparaissent et se déplacent entre les points d'entrecroisement et le point de contact avec le projectile, augmentant la déformation locale des fibres au point d'impact jusqu'à la rupture.



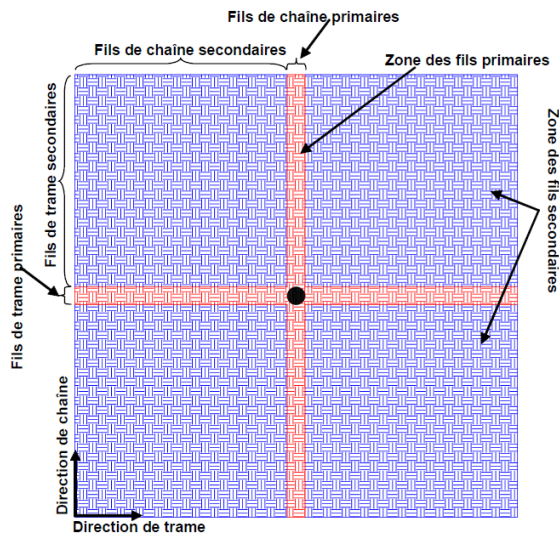


Figure 102. Description du mécanisme d'endommagement d'un tissu à l'impact [45].

Le mécanisme de formation d'un cône absorbe une partie de l'énergie cinétique du projectile. Le diamètre de ce cône est fonction du matériau et augmente avec la rigidité des fils [60]. Le frottement est le premier phénomène non-linéaire d'absorption d'énergie de ces matériaux. Selon le bilan de Shahkarami et al. [26], l'influence du frottement sur la performance balistique est étudiée par plusieurs auteurs en utilisant la technique d'arrachement ("yarn pull-out technic"), pour laquelle Kirkwood et al. [61] ont adapté le système d'essai d'arrachement de Shockey et al. [62] pour tester des fils de para-aramide type Kevlar KM2.

Dans cet essai, le tissu est précontraint et fixé dans la direction transversale, puis des fils sont tirés dans la direction longitudinale. Le comportement de ces fils est divisé en deux phases principales : "un-crimping" et "translation" (Figure 103-gauche). La force pour tirer les fils augmente rapidement dans la phase de "un-crimping" jusqu'à un point "pic", puis diminue progressivement pour tendre vers zéro dans la phase de translation (Figure 103-droite).

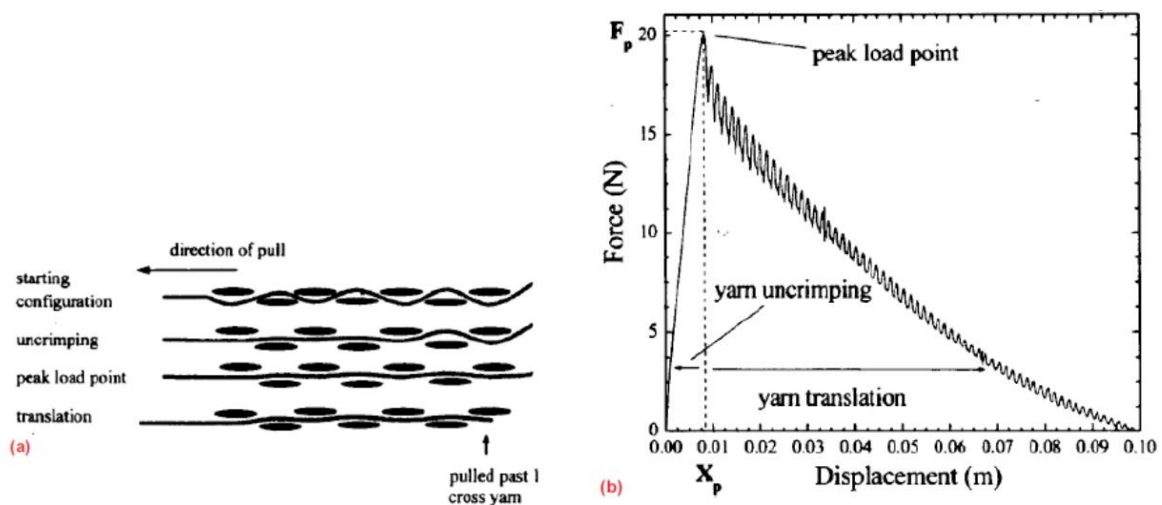


Figure 103. (gauche) Description des phases du comportement d'un fil tiré d'un tissu lors des essais d'arrachement; (droite) Courbe force-déplacement d'un fil lors d'un test d'arrachement ("yarn pull-out") [61].

Kirkwood et al. [63] ont supposé que le processus d'arrachement des fils "yarn pull-out" constitue le principal mécanisme d'absorption d'énergie balistique d'un tissu, ce que Bilisik et al. [64] ont également étudié sur des tissus à base de fils de verre E. En se fondant sur cette hypothèse, un modèle semi-empirique a permis de prédire l'énergie absorbée par un tissu et les valeurs simulées ont été comparées aux valeurs mesurées lors des essais balistiques expérimentaux.

Différentes approches de modèle de comportement à l'impact des structures tissées ont été proposées, démontrant ainsi la complexité du mécanisme d'absorption d'énergie pour les tissus lors de sollicitations dynamiques.

Bazhenov [65] a reconnu que dans les systèmes multi-couches, l'effilochage des fils sur les bords libres est lié à l'énergie d'impact transférée aux fils de chaque couche du tissu. Tan et al. [66] ont également signalé que le glissement des fils était perceptible à proximité des bords libres. Il a été noté que le niveau de glissement du fil varie proportionnellement avec l'énergie absorbée par un tissu. Des essais d'impact ont été conçus pour étudier les effets de frottement entre les fils sur la résistance balistique de tissus en utilisant un traitement chimique [67] pour faire varier la rugosité de la surface des fils. Il a été constaté que les tissus, avec un coefficient de frottement élevé, dissipent une plus grande quantité d'énergie d'impact [68][69].



Lee et al. [53] ont effectué des tests de pénétration à vitesse quasi-statique sur tissu sec et sur le même tissu peu résiné. Leurs résultats ont montré que le composite peut absorber plus d'énergie que le spécimen de tissu sec parce que le glissement des fils au sein de la résine est limité. Dans les travaux de Freeston et al. [70], les résultats de simulation à l'impact d'un tissu 2D ont permis de montrer l'influence des points de liage sur la concentration de contraintes conduisant à une valeur d'allongement des fils de chaîne et trame maximale jusqu'à rupture. Les résultats expérimentaux de Roylance et al. [71] ont permis de mesurer la propagation de l'onde de vitesse à travers un tissu lors d'un impact balistique, ce qui confirme le modèle d'absorption d'énergie par rupture en traction longitudinale dynamique des fils et les frottements des fils entre eux aux différents points de liage du tissu. Par la suite, Parga-Landa et al. [72] ont développé un modèle de comportement à l'impact balistique des tissus fondé sur la conservation de la quantité de mouvement. Sur la base de ce modèle, Billon et al. [73] ont déterminé la perte d'énergie cinétique du projectile par unité de profondeur de pénétration au sein du tissu conduisant à définir la limite de perforation de la structure tissée. Porwal et al. [74] ont présenté par la suite un modèle analytique adapté à la réponse de tissus multi-couches à l'impact balistique fondé sur la conservation de la quantité de mouvement et la théorie de la propagation des ondes. Ce que Gu [75] et Chen et al. [76] ont considéré également pour l'analyse de l'impact des tissus multi-couches à partir du modèle analytique de perforation des tissus d'armure toile impactés par des projectiles rigides de forme cylindrique.

Chocron-Benloulou et al. [77] ont également présenté leur modèle analytique de comportement à l'impact des tissus fondés sur la théorie de la propagation des ondes au sein d'un tissu par Smith et al. [14], ce qui a permis de déterminer la quantité d'énergie absorbée par déformation et la vitesse résiduelle du projectile. Mamivand et al. [78] ont proposé également un modèle analytique fondé sur la théorie de Smith et al. [14] où la traction dynamique des fils est considérée comme l'unique mode de rupture contribuant à la consommation de l'énergie d'impact. Hou et al. [79] ont étendu le modèle aux tissus 3D interlock chaîne en considérant que les fils de chaîne de liage, soumis à de la traction dynamique, contribuent par leur rupture à la consommation de l'énergie d'impact.

Le recours aux images prises par caméra rapide lors d'un impact balistique permet également de visualiser au cours du temps le processus de déformation du tissu sous un impact depuis l'instant du premier contact cible/projectile jusqu'au développement du cône de déformation du tissu autour du point d'impact en face avant, mais aussi la forme et la taille du cône formé par le tissu en face arrière [49][80][81].

Ainsi, différents éléments participent à la consommation de l'énergie cinétique du projectile lors d'un impact sur une cible composée de plusieurs couches de tissu, tels que le propose Nair et al. [82] dans leur modèle analytique fondé sur la théorie de propagation des ondes en milieu poreux et l'équilibre énergétique entre le projectile et la cible impactée. L'énergie cinétique du projectile peut être décomposée par les différentes énergies absorbées des différents modes de déformation des tissus impactés tels que (Figure 104):

- le poinçonnement ("shear plugging")
- la déformation conique du tissu
- la traction dynamique des fils primaires (PY) et secondaires (SY) du tissu
- la compression de la surface du tissu sous le projectile (région 1) et autour de la zone impactée (région 2)
- les frottements, dans le plan du tissu entre les fils et dans l'épaisseur entre le projectile et le tissu.

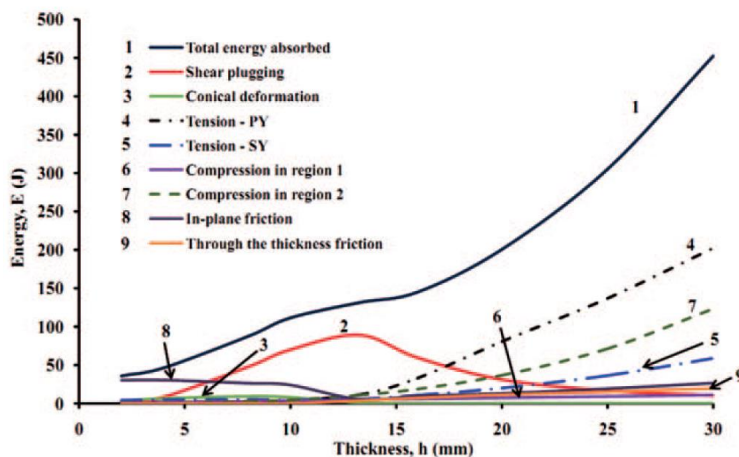


Figure 104. Décomposition de l'énergie absorbée par les différents mécanismes du tissu à base de fils de verre E [82].

Les résultats de cette étude semblent indiquer que l'épaisseur de la cible et donc le nombre de couches de tissu conduit à des mécanismes relativement différents lors d'un impact [82].

Sur la base de la compréhension des mécanismes de déformation du tissu et les énergies associées, nous avons proposé un modèle numérique de tissu 2D puis 3D interlock chaîne à la simulation à l'impact pour identifier les différentes caractéristiques mécaniques du fil et du tissu contribuant à l'absorption d'énergie au cours du temps.

Pour cela, l'approche multi-échelle du modèle numérique d'un tissu 2D, à base de fils para-aramide Kevlar KM2, et proposée initialement par Rao et al. [83], nous a permis de construire un modèle numérique de tissu, initialement 2D mono-couche [20], puis multi-couches [84] et par la suite 3D interlock chaîne [85], optimisant les temps de calcul [86] et reproduisant à l'identique, par simulation [87], les déformations du tissu à l'impact observées lors des essais expérimentaux [88].

En observant les déformations d'un tissu soumis à un impact balistique, nous avons pu localiser deux zones sur le tissu, dont l'une en croix représente la principale zone de travail des fils et de la structure tissée lors de l'impact balistique; ce qui nécessite une représentation à l'échelle mésoscopique, et une autre zone présentant une déformation globale de la structure

résultant de la transmission de l'onde d'impact à la structure tissée et peut être représentée à l'échelle macroscopique par une plaque homogène et isotrope (Figure 105a). Ainsi, le modèle multi-échelle du tissu 2D [20] puis 3D interlock chaîne [85] proposé (Figure 105b), repose donc sur deux zones de calcul: une zone mésoscopique, de fort glissement et rupture des fils, correspondant au point d'impact (Figure 105c) du projectile avec le tissu et les fils de chaîne et trames primaires du tissu formant une croix; puis une zone macroscopique représentant le cône de déformation du tissu. Les connexions entre les modèles mésoscopiques et macroscopiques du tissu (Figure 105d) reposent sur l'hypothèse de Drumheller [89] selon laquelle la transmission et la réflexion des ondes à l'interface sont principalement gouvernées par le rapport entre les impédances acoustiques des deux modèles de matériaux supposés élastiques. Cependant, pour prendre en compte la différence de surface de transmission/ réflexion des ondes entre le modèle mésoscopique (section circulaire ou elliptique du fil) et le modèle macroscopique (section plane du matériau homogène et continu), nous avons considéré la formulation de l'impédance acoustique de Nilakantan et al. [90] intégrant la section du matériau pour assurer une continuité entre les deux modèles.

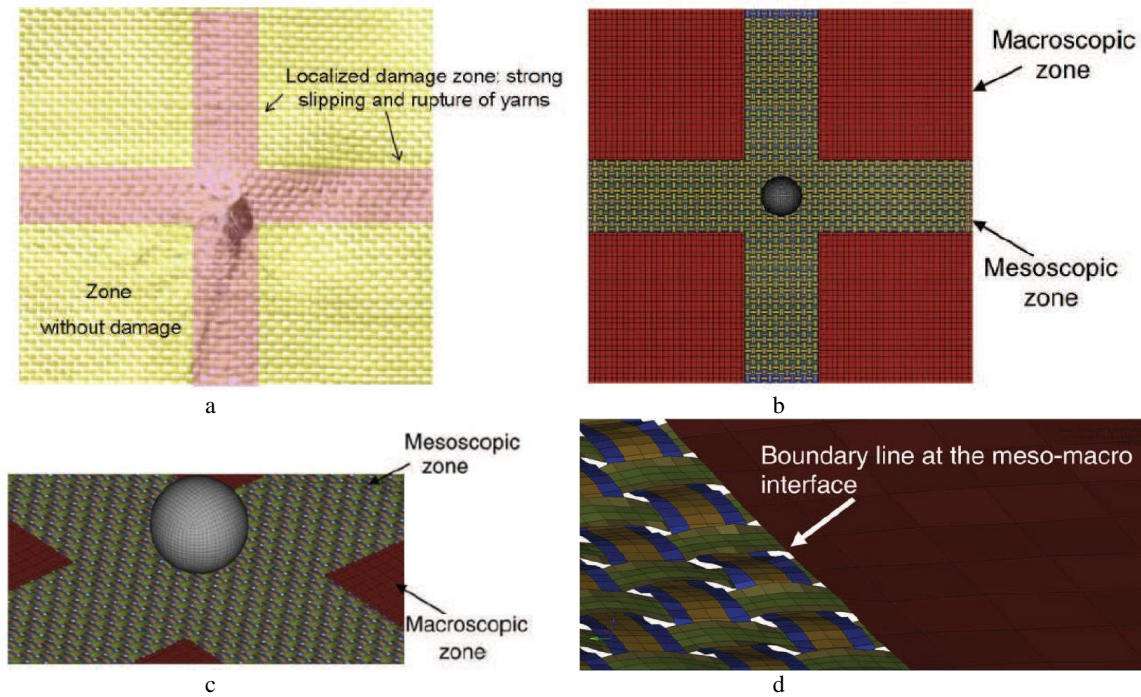


Figure 105. Définition d'un modèle multi-échelle de tissu 3D interlock chaîne: (a) Observation des zones de déformation d'un tissu à l'impact [8] - (b) Vue globale du modèle de tissu 3D interlock chaîne multi-échelle - (c) Vue locale du modèle de tissu 3D interlock chaîne au point d'impact - (d) interface de connexion entre les modèles mésoscopique et macroscopique du tissu 3D interlock chaîne.

Sur la base de ce modèle multi-échelle de tissu, nous avons effectué différentes simulations à deux vitesses d'impact de 60 et 245 m/s en faisant varier les proportions de représentation des modèles macroscopiques et mésoscopiques selon les valeurs suivantes : (0 - 100%; 56,3–43,7%; 65,5–34,5%; 75,3–24,7%). Dans une étude précédente [86], le modèle mésoscopique (0-100%) a été validé aux vitesses de 60 et 250 m/s sur la base d'un processeur AMD 64×4 Dual Core CPU speed 1,79 Ghz RAM 16GB. Nous pouvons observer également, comme pour le modèle de Rao et al. [83], que les temps de calcul ont été fortement réduits pour les modèles multi-échelles par rapport au modèle mésoscopique seul (Figure 106).

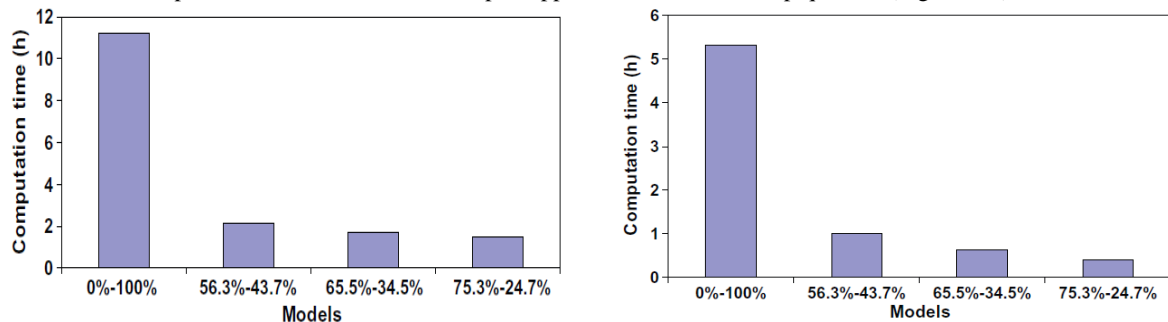
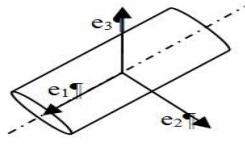


Figure 106. Comparaison des temps de calcul des différents modèles de tissu (X% mésoscopique - Y% macroscopique): issus des simulations à l'impact aux vitesses initiales de : (a) 60 m/s - (b) 245 m/s.

#### D. Influence des caractéristiques mécaniques du fil lors d'un impact balistique

Sur la base du modèle multi-échelles de tissu développé par Ha-Minh [8], nous avons pu mesurer l'influence des caractéristiques mécaniques des fils par simulation d'impact balistique sur un tissu [91]. En considérant les travaux de

recherche récents sur les modèles de fil [92][93][94][95][96], nous avons choisi une loi de comportement du fil de type isotrope transverse (Figure 69).



$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Figure 107. Repère orthonormé associé au fil et la loi de comportement isotrope transverse associée [92][93][94][95][96].

Dans cette formulation, nous avons exclu la contrainte  $\sigma_{33}$  et la déformation  $\varepsilon_{33}$  dans la hauteur de la section du fil en raison d'un rapport très faible entre la hauteur et la largeur de la section (Figure 69). Par simplification, nous avons supposé  $G_{12} = G_{13}$  et  $G_{23}$  proche de zéro, car le fil est composé de multi-filaments séparés. En raison de la symétrie de la matrice de souplesse, on obtient  $\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{\nu_{21}}{E_{22}}$ .

Ainsi, nous avons étudié numériquement les variations des propriétés mécaniques transversales suivantes et leurs effets sur la performance balistique du tissu [97], soumis à l'impact d'un projectile dans la direction  $e_3$ , telles que :

- le coefficient de Poisson  $\nu_{12}$ ,
- le module d'Young transversal  $E_{22}$ ,
- le module de cisaillement  $G_{12}$ .

Nous avons considéré les valeurs des modules de Young, des modules de cisaillement et des coefficients de Poisson pour un fil de para-aramide de type Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$ ) issus de différents travaux de recherche [83] [98] [99] (Tableau 16).

Tableau 21. Valeurs des modules de Young (GPa), de cisaillement (GPa) et coefficient de Poisson pour le fil de para-aramide Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$ ) [83] [98] [99].

$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$\nu_{12}$
84,62	1,34	24,4	0,6

Nous avons pu analyser l'influence des propriétés mécaniques transversales du fil lors de deux configurations d'impact [100], l'une sur fil ondulé et l'autre sur tissu complet.

### 1. Influence du coefficient de Poisson $\nu_{12}$

En faisant varier les valeurs du coefficient de Poisson  $\nu_{12}$  de 0,01 à 0,8 (Tableau 22), nous avons observé les évolutions de la vitesse du projectile en fonction du temps pour deux cas d'impact : sur un fil ondulé (Figure 108 gauche) et sur un tissu (Figure 108 droite). La variation du coefficient de Poisson  $\nu_{21}$  est assurée par la relation de symétrie suivante :  $\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{\nu_{21}}{E_{22}}$ .

Tableau 22. Variation des valeurs du coefficient de Poisson  $\nu_{12}$  pour le fil de para-aramide Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$ ) [83] [98] [99].

$\nu_{12}$
[0,01;0,8]

Toutes les courbes dans le cas d'un impact sur le fil présentent des comportements similaires. La vitesse du projectile diminue lentement dans les premiers  $10 \mu\text{s}$ . En fait, cette période correspond au processus "de-crimping" où le fil est en cours de dépliage. De plus, l'onde de déformation ne peut pas encore se propager longitudinalement, la quantité de matière contribuant à stopper le projectile n'est pas suffisante (Figure 108 gauche).

D'une façon générale, dans le cas d'un impact sur le tissu, toutes les courbes sont également similaires à partir du début de l'impact jusqu'à la rupture du fil (de 0 à  $20 \mu\text{s}$ ). Après  $20 \mu\text{s}$ , une différence relativement faible est observée correspondant à une perturbation du calcul avec une erreur acceptable de  $\pm 0,75 \text{ m/s}$  (Figure 108 droite).

Ainsi, l'ensemble des résultats montre que le coefficient de Poisson  $\nu_{12}$  n'influence pas l'évolution de la vitesse du projectile sur un fil et sur un tissu.

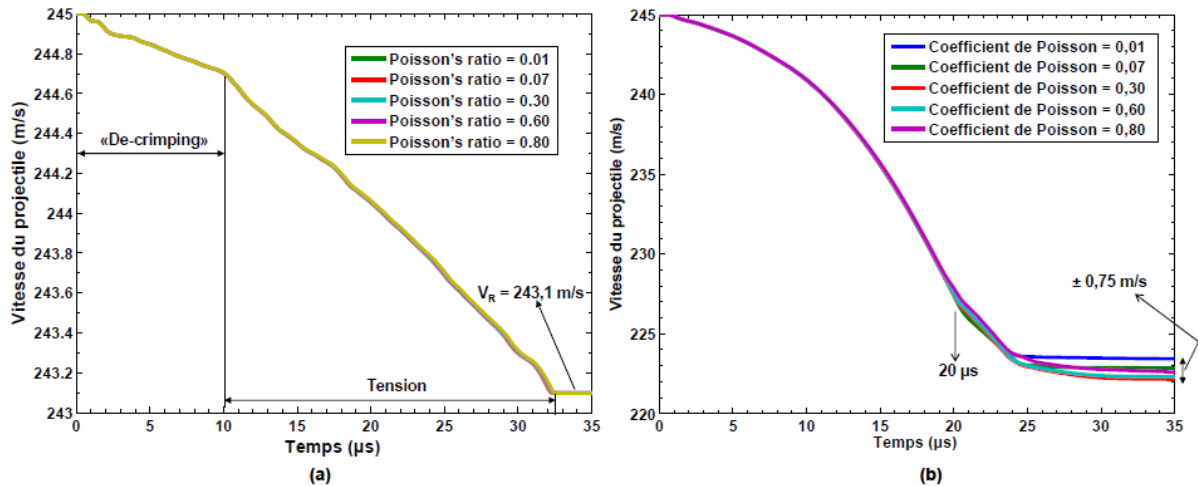


Figure 108. Évolution de la vitesse en fonction de la variation du coefficient de Poisson  $\nu_{12}$  dans le cas d'un impact : (gauche) sur un fil ondulé ; (droite) sur un tissu.

## 2. Influence module d'Young transversal $E_{22}$

En faisant varier les valeurs du module d'Young transversal  $E_{22}$  de 0,06 à 5,36 GPa (Tableau 23), nous avons observé les évolutions de la vitesse du projectile en fonction du temps pour deux cas d'impact : sur un fil ondulé (Figure 109-gauche) et sur un tissu (Figure 109-droite).

Tableau 23. Variation des valeurs du module d'Young transversal  $E_{22}$  pour le fil de para-aramide Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$ ) [83] [98] [99].

$E_{22}$ (GPa)
[0,06; 5,36]

Les différentes courbes d'impact sur fil ondulé (Figure 109-gauche) mettent en évidence les 3 zones principales décrivant l'évolution de la vitesse d'impact en fonction du temps :

- de 0 à 10  $\mu\text{s}$  : c'est le processus "de-crimping" du fil,
- de 10 à 32,5  $\mu\text{s}$  : le fil est mis en tension,
- de 32,5 à 35  $\mu\text{s}$  : après l'instant de rupture du fil, le projectile possède une vitesse résiduelle constante.

Lorsque le module d'Young transversal diminue, la pente des courbes est de plus en plus faible et ces courbes deviennent horizontales correspondant à l'instant de la rupture des fils.

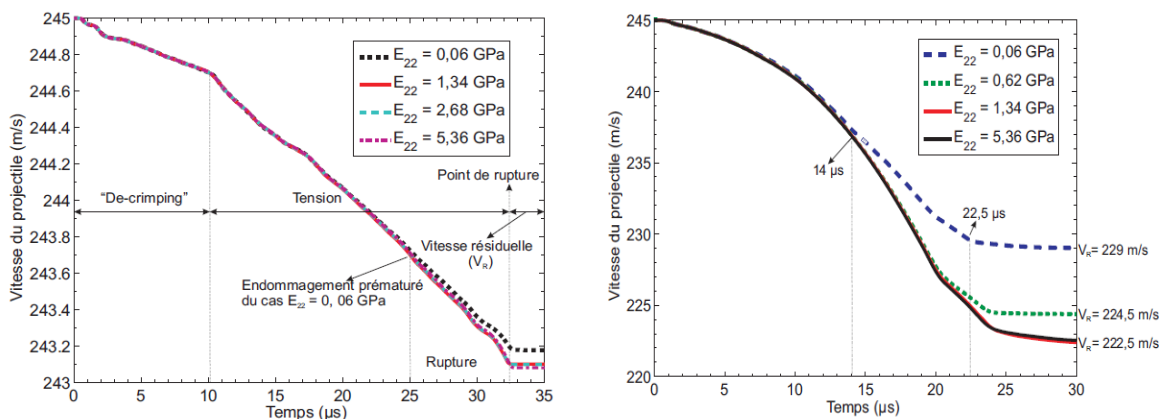


Figure 109. Évolution de la vitesse en fonction de la variation du module d'Young transversal  $E_{22}$  dans le cas d'un impact : (gauche) sur un fil ondulé ; (droite) sur un tissu.

L'évolution de la vitesse du projectile pour un tissu correspondant à 4 valeurs du module transversal : 0,06; 0,62; 1,34 et 5,36 GPa (Figure 109-droite). Pour une valeur faible de  $E_{22} = 0,06$ , l'initiation de la rupture est prématurée puisqu'elle intervient à 14  $\mu\text{s}$ . De même, la perforation du tissu est observée à 22,5  $\mu\text{s}$  pour une vitesse résiduelle égale à 229 m/s. Lorsque la valeur du module d'Young transversal  $E_{22}$  augmente, la vitesse du projectile diminue rapidement, ainsi que la vitesse résiduelle. Par contre, l'évolution de la vitesse du projectile est similaire pour une valeur de  $E_{22}$  supérieure ou égale à 1,34 GPa.

En effet, le comportement principal des fils pendant l'impact est la traction et le cisaillement; ce qui implique que le module transversal  $E_{22}$  n'influe pas sur les performances balistiques du tissu.



### 3. Influence du module de cisaillement $G_{12}$

En faisant varier les valeurs du module de cisaillement  $G_{12}$  de 0,1 à 70 GPa (Tableau 24), nous avons observé les évolutions de la vitesse du projectile en fonction du temps pour deux cas d'impact : sur un fil ondulé (Figure 110-gauche) et sur un tissu (Figure 110-droite).

Tableau 24. Variation des valeurs du module de cisaillement  $G_{12}$  pour le fil de para-aramide Kevlar KM2 ( $\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$ ) [83] [98] [99].

$G_{12}$ (GPa)
[0,1; 70]

Nous pouvons observer que jusqu'à  $10 \mu\text{s}$ , la vitesse du projectile diminue de façon identique pour les valeurs du module de cisaillement  $G_{12}$  compris entre 0,1 et 24,4 GPa, valeur maximale déterminée expérimentalement par Cheng et al. [98] (Figure 110-gauche). Pour des valeurs du module de cisaillement  $G_{12}$  inférieures à 1 GPa, une rupture prématurée des fils peut être observée. Lorsque la valeur du module de cisaillement est supérieure à 48,0 GPa, la rupture est presque instantanée. Ce qui implique un comportement par cisaillement comme mode principal de rupture comparé au mode par traction et flexion.

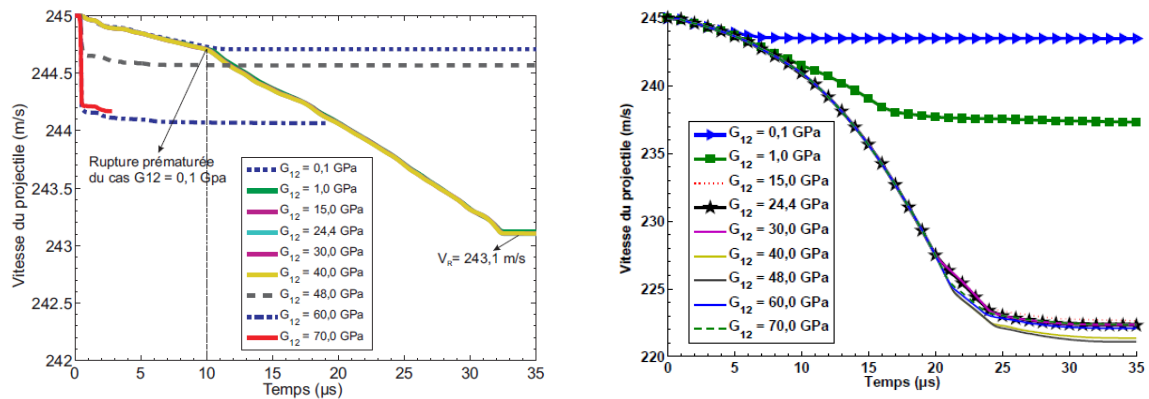


Figure 110. Évolution de la vitesse en fonction de la variation du module de cisaillement  $G_{12}$  dans le cas d'un impact : (gauche) sur un fil ondulé ; (droite) sur un tissu.

Les ruptures des fils réduisent la résistance balistique du tissu et provoquent une perforation prématurée (Figure 110-droite). Les évolutions de la vitesse d'impact sont similaires pour des valeurs du module de cisaillement  $G_{12}$  variant entre 15 et 70 GPa. La structure du tissu crée un effet qui permet de réduire l'énergie d'impact sur chaque fil et atténue le mode de rupture instantanée par cisaillement dans le cas d'un impact sur un fil seul. Le module de cisaillement  $G_{12}$  affecte le comportement à l'impact du fil et du tissu.

### 4. Influence du frottement des fils

La mesure de l'influence du frottement fil/fil, par simulation numérique [101], sur les performances à l'impact balistique a permis de distinguer 3 classes de valeurs du coefficient de frottement de la loi de Coulomb; faible ( $\mu = [0 - 0,06]$ ), moyenne ( $\mu = [0,06 - 0,2]$ ) et forte ( $\mu = [0,2 - 1]$ ). De faibles valeurs du coefficient de frottement réduisent fortement la cohésion de la structure tissée et compromettent les performances balistiques du tissu, de fortes valeurs du coefficient de frottement limitent le glissement des fils entre eux et provoquent des concentrations de contraintes fortes aux points de liage du tissu ce qui favorisent des ruptures prématurées de fils. Enfin, une valeur de coefficient de frottement de 0,2 permet de maintenir la cohésion de la structure tissée lors d'un impact balistique.

Dans le cadre de nos travaux de recherche [102][103], nous avons également étudié l'influence du coefficient de frottement fil/fil et fil/projectile sur le comportement d'une structure tissée 3D interlock chaîne lors d'un impact balistique. Nous avons testé un modèle numérique de tissu 3D interlock chaîne à 5 couches à base de fils de para-aramide de type Interlock O - liage T 1-5-5 à l'impact numérique d'une bille en acier (diamètre 6,5 mm, masse 1,12 g) à différentes vitesses (Figure 111-gauche). Le modèle numérique du tissu 3D interlock chaîne a été réalisé à partir de l'outil KTex [104], développé sous Hypermesh [105], en considérant les valeurs des caractéristiques mécaniques du fil para-aramide Kevlar KM2 [98] du Tableau 16 et une valeur du coefficient de frottement de la loi de Coulomb égal à 0,5 (Figure 111-milieu).



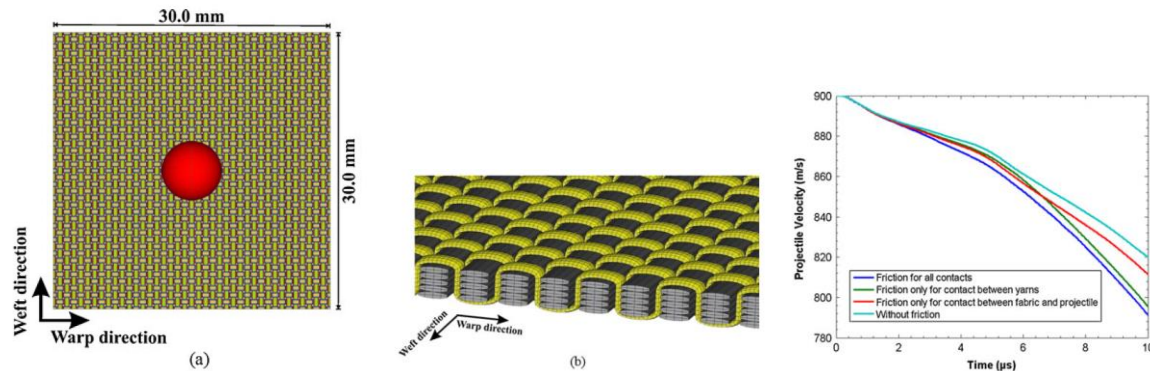


Figure 111. (gauche) Vue de dessus des dimensions du tissu 3D interlock chaîne soumis à l'impact d'une bille rigide - (milieu) Vue 3D de l'architecture tissée [104] du tissu interlock O - Liage T 1-5-5 à base de fils para-aramide Kevlar KM2 - (droite) Représentation des différentes évolutions au cours du temps de la vitesse résiduelle du projectile en fonction de la prise en compte des différents types de frottement.

Différents paramétrages des frottements fil/fil et fil/projectile du tissu 3D interlock chaîne ont été considérés, tels que : (cas 1) prise en compte des frottements fils/fils et fils/projectile, (cas 2) prise en compte du frottement fils/fils, (cas 3) prise en compte du frottement fils/projectile et (cas 4) pas de frottement. La représentation de l'évolution au cours du temps de la vitesse résiduelle de la bille d'acier, de vitesse initiale à 900 m/s représentatif d'un cas de perforation, révèle des différences importantes entre les différents cas de prise en compte des valeurs de frottement du modèle de tissu 3D interlock chaîne (Figure 111-droite). En effet, à l'instant  $t = 10 \mu s$ , nous pouvons mesurer l'influence de la prise en compte des valeurs de frottement fils/fils et fils/projectile (Figure 112-gauche) sur la déformation du tissu 3D interlock chaîne lors d'un impact à 900 m/s comparativement au cas de non prise en compte des valeurs de frottement (Figure 112-droite), dont les valeurs résiduelles de la vitesse du projectile sont respectivement de 790 m/s pour le cas avec les frottements et 822 m/s pour le cas sans frottements.

L'outil de modélisation numérique du tissu 3D interlock chaîne [104], développé dans le cadre de la thèse de Ha-Minh [8], repose sur deux hypothèses : les fils de trame sont toujours droits dans les armures des tissus et la section transversale a une forme constante le long du fil. L'interpénétration au contact entre les fils n'existe plus. Grâce à cet outil, les fils sont créés dans un modèle géométrique où la taille du tissu est arbitrairement sélectionnée. Le modèle d'architecture d'un tissu est périodique, ce qui permet de définir un élément représentatif de la structure tissée.

Après la modélisation géométrique du tissu, chaque fil est discrétisé en éléments coques ou solides dont la taille peut être sélectionnée. Les éléments sont créés et organisés en groupes ou composants différentes correspondant au type de fil, aux caractéristiques des éléments et aux matériaux. Ainsi, leurs axes locaux sont orientés le long de l'axe longitudinal des fils, ce qui favorise l'application d'une loi de comportement du matériau sur les éléments d'un fil, car les propriétés du matériau du fil sont constantes sur toute la longueur du fil. Le solveur explicite utilisé pour ces simulations est l'outil Radioss [106].

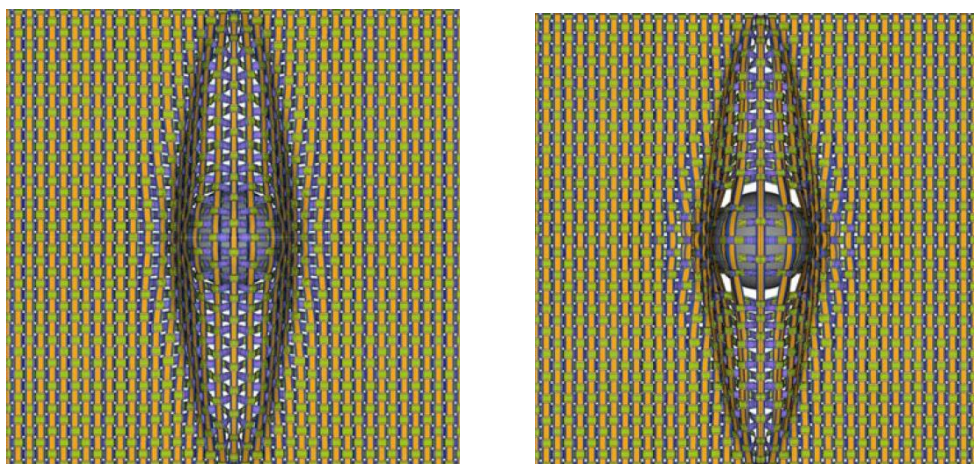


Figure 112. Représentation à  $t = 10 \mu s$  de la déformation du tissu 3D interlock chaîne soumis à l'impact d'une bille d'acier à 900 m/s pour les deux paramétrages suivants: (gauche) prise en compte du frottement fils/fils et fils/projectile - (droite) aucun frottement fils/fils et fils/projectile.

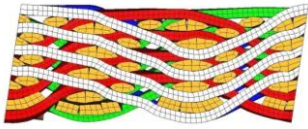
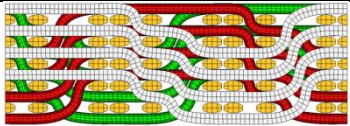
## 5. Influence de la géométrie du tissu

Dans le cadre de nos travaux de recherche [107][108][109], nous avons étudié l'influence de la précision de représentation de la géométrie d'un tissu 3D interlock chaîne pour des modèles numériques soumis à des simulations d'impact balistique. Différentes représentations d'un même tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-5 armure diagonale 6-4 à

base de fils para-aramide 3360 dTex ont été utilisées comme base de modélisation numérique dont la précision géométrique a été améliorée par le biais d'images tomographiques du tissu réel [9]. La géométrie du modèle de calcul "Calc 1" (Tableau 25) est issue de ce processus d'acquisition par images tomographiques réelles et reconstruction manuelle du volume élémentaire représentatif de la structure tissée 3D [109] et la géométrie du modèle de calcul "Calc 2" (Tableau 25) est obtenue par l'introduction des paramètres de l'architecture tissée 3D interlock chaîne dans le module Ktex [102].

Les deux géométries du même tissu 3D interlock chaîne révèlent des taux de compaction des fibres différents, des trajectoires de fils de chaîne et trame et des géométries de section des fils différentes.

Tableau 25. Caractéristiques géométriques des deux tissus 3D interlock chaînes.

Numéro modèle de calcul	Géométrie des tissus 3D interlock chaîne	Épaisseur moyenne des tissus (mm)	Taux volumique de fibre calculé (%)
Calc 1		5,04	75
Calc 2		5,75	43

Les simulations d'impact d'une bille d'acier (diamètre 10 mm, masse 1,21 g) à 176 m/s sur les différents modèles géométriques des tissus ont permis d'observer les évolutions des vitesses résiduelles des projectiles au cours du temps (Figure 113-gauche), jusqu'à l'arrêt complet du projectile à  $t = 0,25s$ , et le suivi de la déformée arrière des tissus au cours du temps (Figure 113-droite).

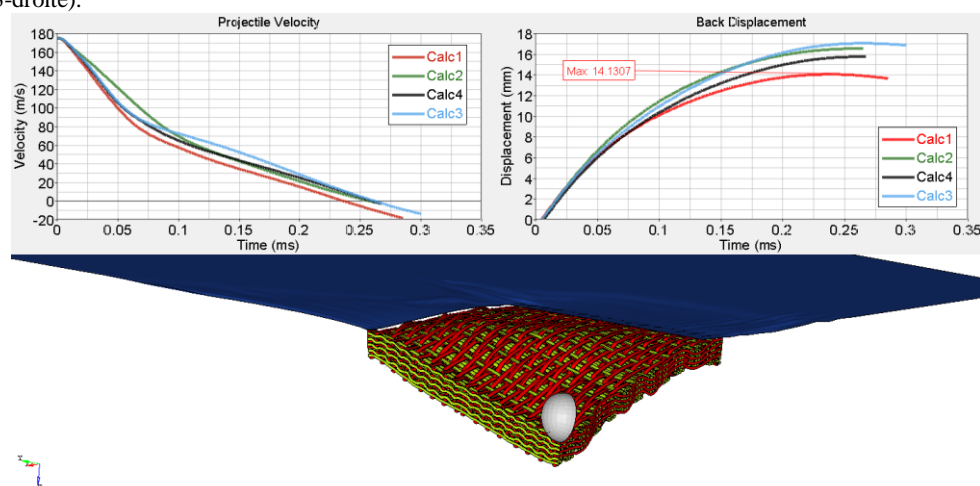


Figure 113. (gauche) Évolution de la vitesse résiduelle de la bille d'acier (diamètre 10 mm, masse 1,2 g) au cours du temps lors d'un impact sur les différentes géométries du tissu 3D interlock chaîne - (droite) Évolution de la déformée arrière des différentes géométries du tissu 3D interlock chaîne au cours du temps.

Nous avons pu mesurer les différences d'évolutions des vitesses résiduelles du projectile au cours du temps entre les deux modèles "Calc 1" et "Calc 2", dont le premier modèle s'approche le plus des résultats expérimentaux, ainsi qu'une différence de 2 mm à l'instant  $t = 0,25s$  de la déformée arrière du tissu. Cependant, les temps de reconstruction de la géométrie du modèle de tissu "Calc 1" sont relativement long et coûteux comparativement au gain de performance balistique apportée par l'amélioration de la géométrie initiale. De futurs travaux de recherche peuvent être effectués pour automatiser le processus d'acquisition de la géométrie d'un tissu 3D interlock chaîne à partir d'images tomographiques pour fournir un modèle numérique de la structure tissée.

## E. Études expérimentales sur le comportement à l'impact de tissu 3D interlock chaîne

Dans le cadre de nos travaux de recherche [110][111][112][113][114][115][116][117][118][119][120][121], nous avons effectué différentes études expérimentales sur le comportement à l'impact de différents tissus 3D interlocks chaînes.

Initialement, un état de l'art complet sur les différents types de menaces balistiques conventionnelles et non conventionnelles (type IEDs) nous a permis de réaliser différentes campagnes de tirs sur différents matériaux textiles de référence, tels que : du feutre (non tissé compacté) de para- aramide, des structures uni-directionnelles de para-aramide et de polyéthylène, des structures tissées multi-couches de para-aramide et d'armure toile ainsi que des tissus 3D interlock chaîne à base de fils de para-aramide [110].

La comparaison, à iso-masse surfacique, d'un tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - liage T 9-5-5 sur la base d'un sergé de 10 effet trame cordon à droite à base de fils para-aramide (Twaron 1100 dTex) et soumis à des impacts de billes

rigides (diamètre 6 mm, masse 0,87 g) pour une vitesse moyenne d'impact de 677 m/s, avec un empilement de tissus non liés d'armure toile à base de fils para-aramide (Twaron 930 dTex) soumis au même projectile avec une vitesse moyenne d'impact de 658 m/s, nous a permis de révéler une meilleure capacité d'absorption d'énergie de la structure à base de tissus empilés (Figure 114) [111].

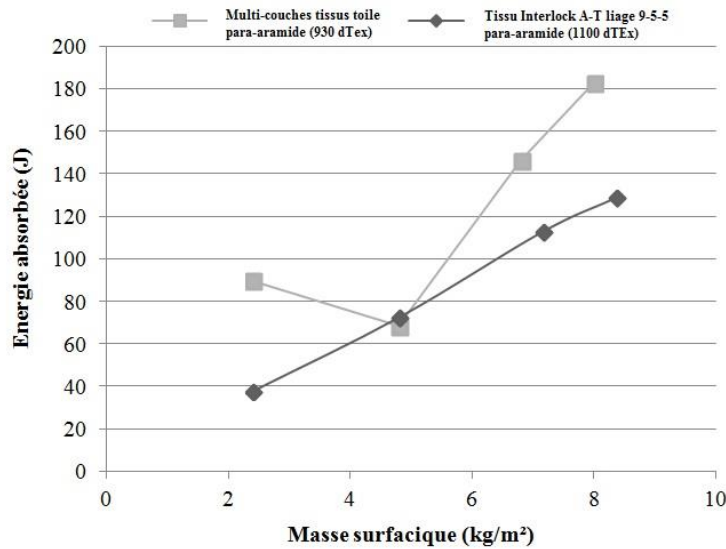


Figure 114. Comparaison, à iso-masse surfacique, de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact de l'empilement de tissus non liés à base d'armure toile de para-aramide (930 dTex) et d'un tissu 3D interlock chaîne à base de fils para-aramide (1100 dTex) de type Interlock A - liage T 9-5-5 sur la base d'un sergé de 10 effet trame cordon à droite.

Afin d'augmenter la résistance à l'impact de cette architecture de tissu 3D interlock chaîne, une nouvelle solution hybride (Figure 115 - gauche) [111] intégrant des fils inox, insérés dans le tissu au cours de la fabrication puis positionnés sur les faces avant et arrière de la cible, a été proposée (Figure 115 - droite) afin d'augmenter la rigidité en surface des tissus, mais aussi de favoriser le changement de direction de la trajectoire du projectile au cours de la pénétration.

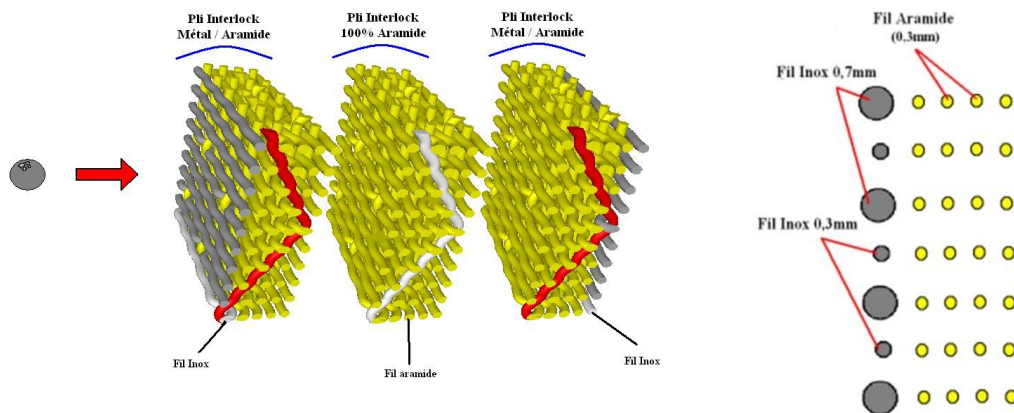


Figure 115. (gauche) Représentation de la cible complète composé de 3 plis de tissus 3D interlock chaîne - (droite) Vue en coupe de la section des fils de trame des fils inox et para-aramide (1100 dTex) au sein d'un pli de tissu 3D interlock chaîne.

Le tissu 3D interlock chaîne, de type Interlock A - liage T 9-5-5 sur la base d'un sergé de 10 effet trame cordon à droite à base de fils para-aramide (Twaron 1100 dTex) et de fils inox, soumis à des impacts de billes rigides (diamètre 6 mm, masse 0,87 g) pour une vitesse moyenne d'impact de 653 m/s, n'a pas permis d'améliorer la consommation de l'énergie d'impact de la cible finale au regard de l'augmentation de la masse surfacique (Figure 116) comparativement aux autres structures [111].



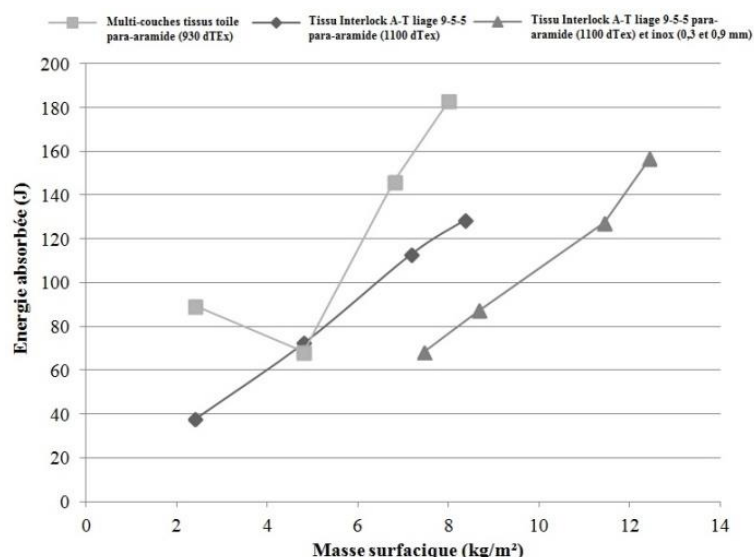


Figure 116. Comparaison, à iso-masse surfacique, de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact du tissu 3D interlock chaîne à base de fils para-aramide (1100 dTex) de type Interlock A - liage T 9-5-5 sur la base d'un sergé de 10 effet trame cordon à droite avec des fils d'inox (0,3 et 0,9mm de diamètre) disposés en alternativement en surface du tissu avec les structures précédentes.

Compte tenu de l'importance de l'épaisseur des cibles [122] et de la géométrie [123] de la structure tissée sur le comportement à l'impact d'un tissu 3D interlock chaîne, nous avons proposé une nouvelle architecture à 11 couches de type Interlock O - liage L 1-1-11 avec fils de chaîne de renfort à base de fils para-aramide seuls (Twaron 930 dTex) (Figure 117) [112].

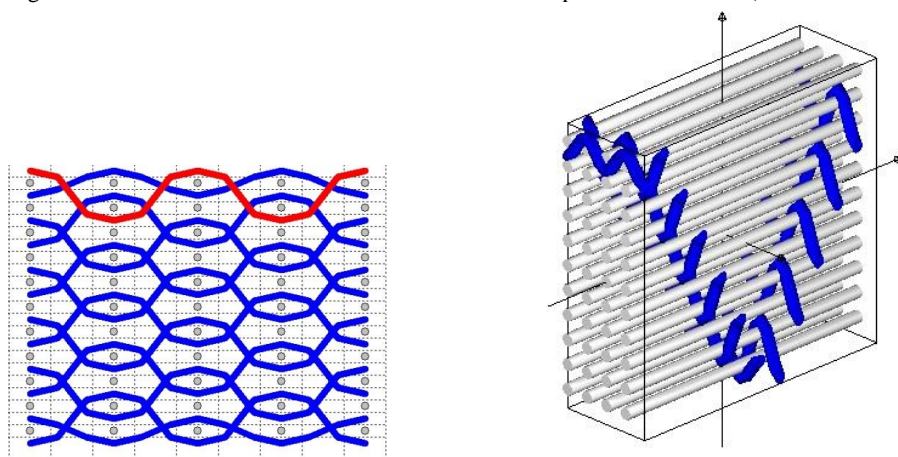


Figure 117. Représentation du tissu Interlock O - liage L 1-1-11 avec fils de chaîne de surface: (gauche) vue en coupe de la section des fils de trame - (droite) vue 3D de la structure tissée.

En complément de la solution hybride précédente, nous avons proposé d'améliorer la performance de ce type de solution en substituant les fils inox, disposés à la surface du tissu, par un pli de tissu 3D interlock chaîne à base de fils de carbone 6k pour conserver une rigidité en face avant de la cible finale, tout en réduisant sa masse surfacique [112]. Lors de la pénétration de la bille au sein du premier pli de tissu 3D interlock chaîne à base de fils de carbone 6k, des fibres de carbone sont supposées s'agglomérer et former une "bourre" de fibre de carbone aidant à diminuer la vitesse du projectile par une augmentation de la surface de contact, de sa taille et du coefficient de frottement (Figure 118).

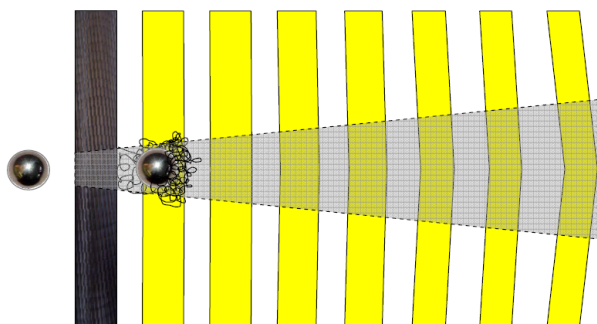


Figure 118. Schéma hypothétique d'absorption d'énergie à travers les couches pour un assemblage hybride d'un pli de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O - liage L 1-1-11 à base de fils de carbone 6k et de plusieurs plis de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O - liage L 1-1-11 à base de fils de para-aramide (930 dTex).

En considérant que les vitesses moyennes d'impact de la bille rigide d'acier (diamètre 6 mm, masse 0,87 g) sont respectivement de : 698 m/s pour la cible hybride intégrant un pli de tissu 3D interlock chaîne à base de fils de carbone et plusieurs plis de tissu 3D interlock chaîne à base de fils para-aramide (Twaron 930 dTex); et 678 m/s pour le tissu interlock O - liage L 1-1-11 avec fils de chaîne de renfort à base de fils para-aramide seuls ((Twaron 930 dTex); nous avons pu comparer, à iso-masse surfacique, les capacités d'absorption de l'énergie cinétique d'impact des différentes solutions proposées.

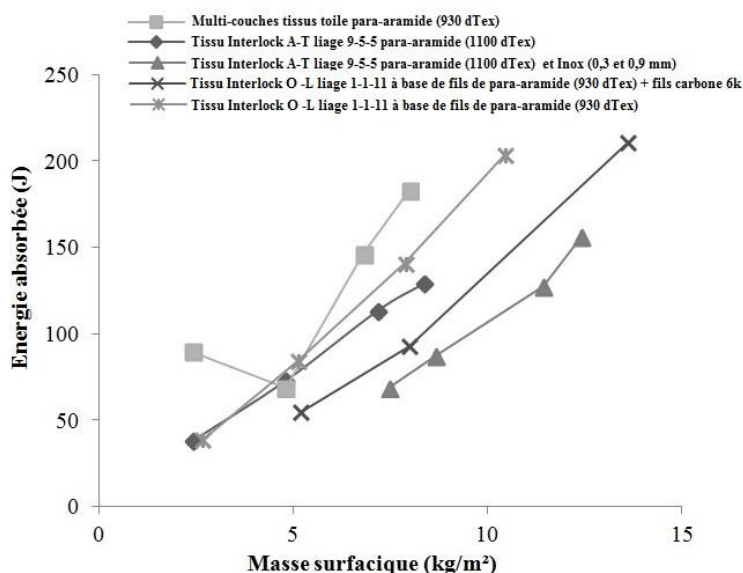


Figure 119. Comparaison, à iso-masse surfacique, de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact de l'assemblage hybride d'un pli de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O - liage L 1-1-11 à base de fils de carbone 6k et de plusieurs plis de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O - liage L 1-1-11 à base de fils de para-aramide (930 dTex), des plis seuls de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O - liage L 1-1-11 à base de fils de para-aramide (930 dTex) et les structures précédentes.

Nous avons observé une augmentation de l'absorption de l'énergie cinétique d'impact en substituant les fils d'inox en surface du tissu 3D interlock chaîne par les fils de carbone 6k, mais aussi en augmentant à 11 couches la nouvelle architecture tissée du tissu Interlock O - liage L 1-1-11 à base de fils para-aramide (930 dTex).

Enfin, l'influence du titrage du fil sur la capacité d'absorption de l'énergie cinétique d'impact a été confirmé par l'étude comparative entre des tissus 3D interlocks chaîne et des structures multi-couches de tissu à base des mêmes fils de para-aramide (1680 dTex) [113]. Dans cette même étude, une hybridation de plis a été proposée (plis de multi-couches de tissus toile avec plis de tissu 3D interlock chaîne) à base des mêmes fils de para-aramide (930 dTex), permettant d'introduire une hétérogénéité de comportement lors de l'impact [124].



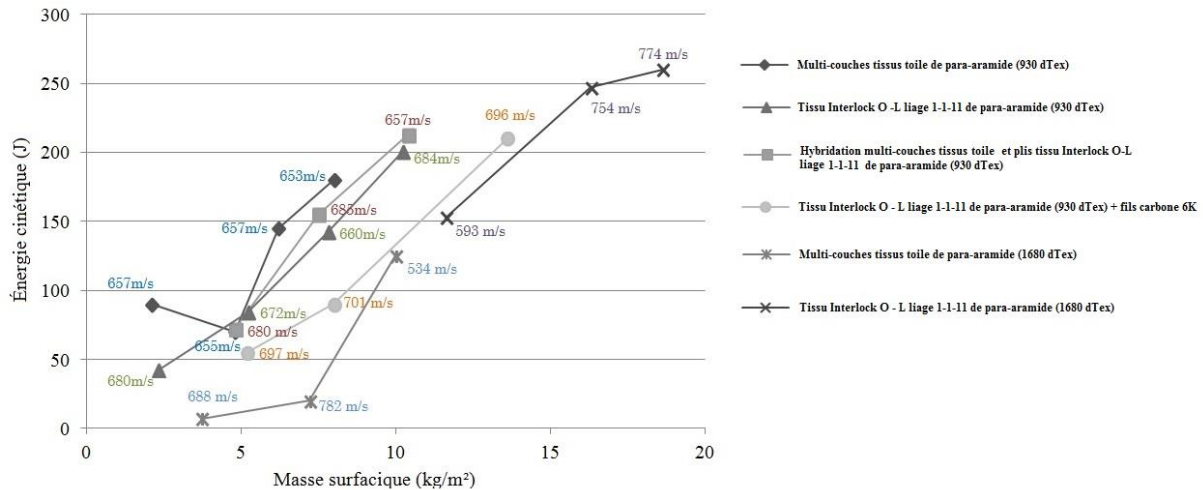


Figure 120. Comparaison, à iso-masse surfacique, de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact des différentes structures multi-couches tissées et tissus 3D interlock chaîne avec les valeurs des vitesses d'impact initiales de la bille rigide.

Nous pouvons montrer par ces différents essais que le titrage du fil de para-aramide influe significativement sur la capacité d'absorption de l'énergie cinétique d'impact des structures tissées multi-couches; en effet, la densité des fils plus importante pour des titrages plus fins (930 dTex) au sein du tissu permet d'impliquer plus de fils en contact direct avec le projectile que pour les titrages plus gros (1680 dTex). L'hybridation de plis proposée (plis de multi-couches de tissus toiles avec plis de tissu 3D interlock chaîne) à base des mêmes fils de para-aramide (930 dTex) apporte une légère augmentation de la capacité d'absorption de l'énergie d'impact que pour le tissu interlock O - liage L 1-1-11 seul.

Afin de conforter la même tendance de l'influence de l'épaisseur des cibles composées de multi-couches de tissus cousus sur les performances à l'impact [122]; nous avons soumis 4 cibles [114] de différentes épaisseurs de plis, respectivement 3, 5, 7 et 9 plis, à différentes valeurs de vitesse d'impact de bille rigide (diamètre 6 mm, masse 0,87 g) [125]. Chaque pli est composé d'un tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O -Liage L 1-2-7 à base de fils para-aramide de 1680 dTex (réduction chaîne : 42 fils/cm; réduction trame : 42 duites/cm) (Figure 121).

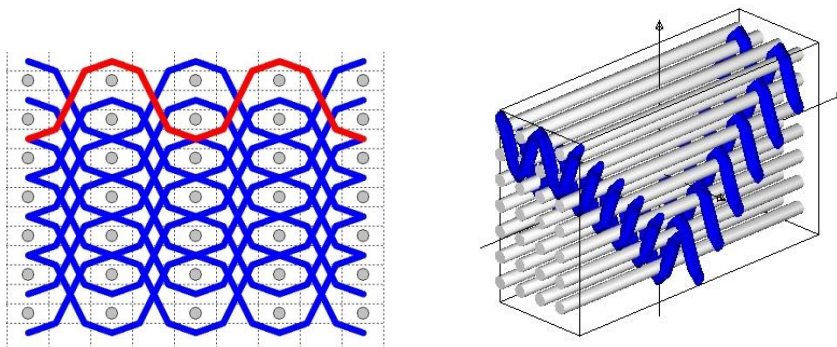


Figure 121. Représentation du tissu Interlock O - liage L 1-2-7 à base de fils de para-aramide 1680 dTex: (gauche) vue en coupe de la section des fils de trame - (droite) vue 3D de la structure tissée.

Nous pouvons mesurer la vitesse résiduelle de sortie du projectile de chaque cible pour différentes vitesses initiales d'impact, nous permettant d'observer l'influence du nombre de plis d'une même structure tissée 3D interlock chaîne sur la capacité d'absorption de l'énergie cinétique de chaque cible (Figure 122).

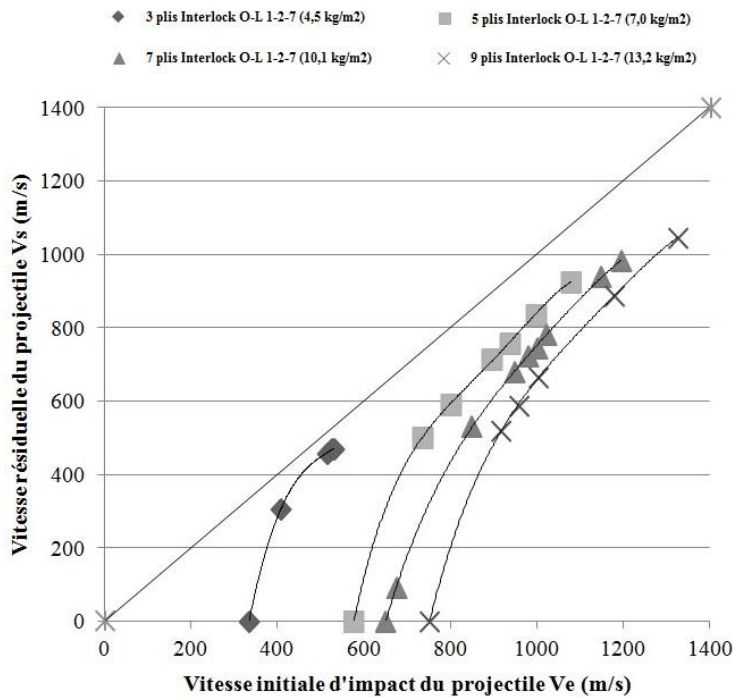


Figure 122. Représentation des vitesses résiduelles  $V_s$  d'une bille rigide (diamètre 6 mm, masse 0,87 g) pour différentes vitesses initiales d'impact  $V_e$  en sortie de chacune des 4 cibles composées de 3, 5, 7 et 9 plis de tissu Interlock O - L 1-2-7 à base de fils para-aramide 1680 dTex.

Au-delà de la vitesse initiale d'impact du projectile de 800 m/s, le comportement de chaque cible semble être linéaire, indépendamment du nombre de plis.

Par la suite, dans le cadre de nos travaux de recherche [114], nous avons identifié les paramètres d'un tissu 3D interlock chaîne pouvant influencer la capacité d'absorption de l'énergie cinétique d'impact, en faisant varier les densités de fils de chaîne et trame des structures pour une même architecture tissée [125] de type Interlock O - Liage L 1-2-7 à base de fils para-aramide de 1680 dTex. Ainsi, nous avons soumis 4 cibles, à différentes vitesses initiales d'impact d'une bille rigide (diamètre de 6 mm et masse de 0,87g), de 3 plis de tissu 3D interlock chaîne, dont la déclinaison en trois classes de structure tissée, selon les valeurs des densités des fils de chaîne et trame, conduit à une homogénéité de type : faible (Interlock O - Liage L 1-2-7 (18 fils chaînes/cm - 80 fils trames/cm)), moyenne (Interlock O - Liage L 1-2-7 (30 fils chaînes/cm - 56 fils trames/cm) et Interlock O - Liage L 1-2-7 (60 fils chaînes/cm - 37 fils trames/cm)) et forte (Interlock O - Liage L 1-2-7 (42 fils chaînes/cm - 42 fils trames/cm)).

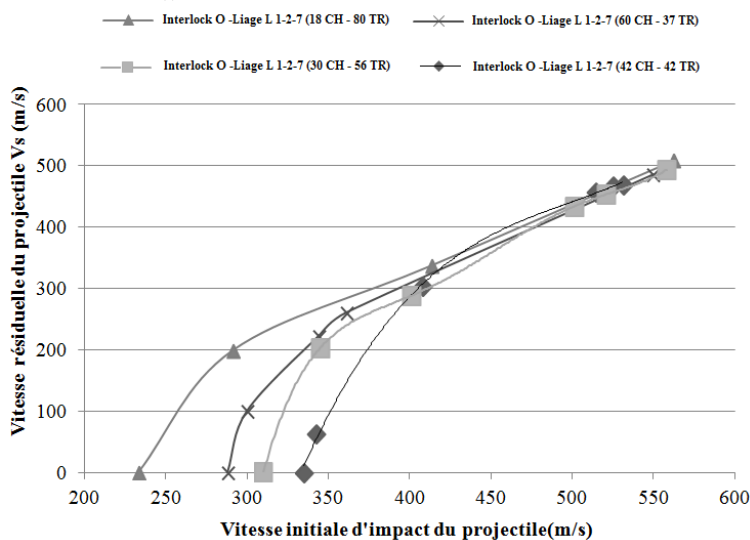


Figure 123. Représentation des vitesses résiduelles  $V_s$  d'une bille rigide (diamètre 6 mm, masse 0,87 g) pour différentes vitesses initiales d'impact  $V_e$  en sortie de chacune des 4 cibles composées de 3 plis de tissu Interlock O - L 1-2-7 à base de fils para-aramide 1680 dTex avec différentes valeurs de densité en fils de chaîne et trame.

Nous pouvons observer que l'homogénéité en terme de répartition entre les valeurs des densités des fils de chaîne et trame contribue à un meilleur comportement des 3 plis de la même architecture tissée du tissu Interlock O - Liage L 1-2-7 à base de fils para-aramide 1680 dTex. Cependant, au-delà de la vitesse initiale d'impact de 400 m/s, la différence d'homogénéité entre les structures semble s'estomper pour aboutir aux mêmes valeurs de la vitesse résiduelle du projectile.

Enfin, dans le cadre de nos travaux de recherche [114], nous avons identifié les paramètres d'un tissu 3D interlock chaîne pouvant influencer sur la capacité d'absorption de l'énergie cinétique d'impact en faisant varier le nombre de couches, respectivement de 5 à 7 couches, d'un tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O - Liage L 1-2 [125] à base de fils para-aramide de 1680 dTex (Figure 124).

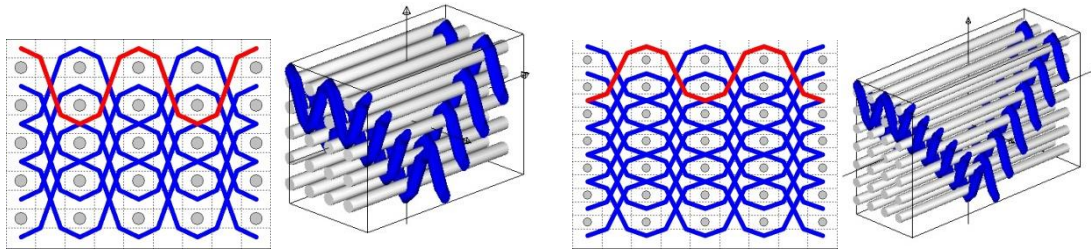


Figure 124. Représentations des tissus Interlock O - Liage L 1-2 à 5 couches (gauche) et à 7 couches (droite).

Nous pouvons observer que l'augmentation du nombre de couches au sein d'un même tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O - Liage L 1-2 favorise une meilleure capacité d'absorption de l'énergie cinétique d'impact. Cependant, au-delà de la vitesse initiale d'impact de 400 m/s, la différence du nombre de couches entre les structures tissées tend à se réduire pour obtenir quasiment les mêmes valeurs de la vitesse résiduelle du projectile.

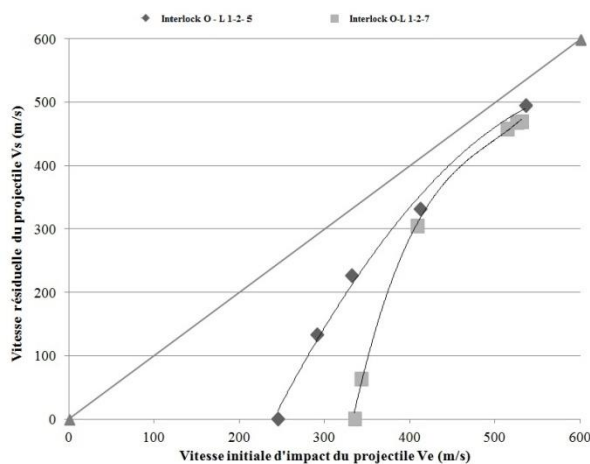


Figure 125. Variation de la vitesse de sortie du projectile par rapport à sa vitesse d'entrée vis-à-vis de la variation du nombre de couches internes.

## F. Conclusion sur le modèle du comportement à l'impact

Le phénomène d'impact sur un tissu et la compréhension du mode de comportement associé reste avant tout un évènement complexe par son caractère dynamique, mais aussi par l'influence de multiples paramètres. En effet, la caractérisation à l'échelle dynamique des évènements nécessite une instrumentation fiable pour permettre des mesures correctes et suffisamment précises des mouvements et déformations à vitesse rapide des matériaux. Nous avons souligné également les différentes études existantes qui nous ont permis de converger vers un modèle de comportement d'un tissu à l'impact dépendant de paramètres endogènes du tissu (nature et type des fils, épaisseur, architecture, type d'armures, densité des fils de chaîne et trame), mais aussi exogènes (fixation et orientation du tissu, inclinaison de la cible, forme et vitesse du projectile). Par le biais de ces observations nous avons pu modéliser le comportement dynamique d'un tissu soumis à des impacts balistiques et mesurer l'influence des paramètres du fil et tissu sur la capacité d'absorption de l'énergie cinétique d'impact. Ainsi, nous avons souligné l'importance de caractériser dynamiquement les propriétés mécaniques du fil, tels que le module de Young ou le module de cisaillement, mais aussi le coefficient de frottement de type fils/fils et fils/projectile pour alimenter les paramètres du modèle numérique du tissu à l'impact. Cette caractérisation dynamique du fil se poursuit dans le cadre de la thèse de doctorat de Chevalier [11].

### III. Solutions de protection souple à l'impact

La protection souple à l'impact se définit principalement par différents niveaux de performance répondant aux différentes menaces balistiques, répertoriées dans la norme NIJ 0101-06 [31], tout en respectant trois critères principaux, tels que : la performance, l'ergonomie (poids, flexibilité) et le coût total [126]. Dans une étude récente et très complète sur les différents brevets existants de protection souple à l'usage de la personne [127], ainsi que dans le cadre de nos différents travaux de recherche [128][129][130][131], l'optimisation de ces trois critères, selon les configurations de menaces et d'utilisation, a nécessité le développement de nouvelles solutions pour : mieux absorber l'énergie cinétique d'impact du projectile, rendre plus proche du corps la protection souple et minimiser les coûts des matériaux fibreux.

#### A. Gilet pare balles intégrant des fils à mémoire de forme

Initialement, le fil à mémoire de forme [132] à base de Nickel-Titane (Nitinol [133]), inséré dans une structure composite rigide à base de fils graphites résinés époxy, a montré de bonne capacité d'absorption à l'énergie d'impact faible vitesse [134][135], ainsi que dans des structures composites à base de fils de verre E résinés époxy [136][137][138]. Dans le cadre de nos premiers travaux de recherche sur les protections souples de type gilet pare balles [139], nous avons exploité la capacité d'absorption du matériau à mémoire de forme dans la phase de transition martensitique - austénitique lors d'un impact balistique [140][141][142] (Figure 126).

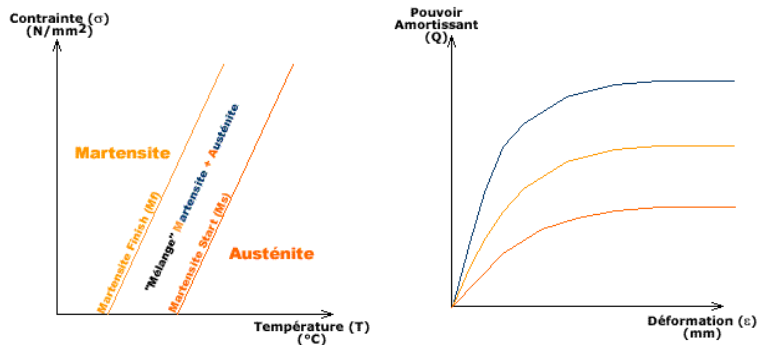


Figure 126. (gauche) Représentation des différentes transitions de phase de fil métallique à mémoire de forme de type Nickel-Titane[132] - (droite) Évolution du pouvoir amortissant des différentes phases de transition du matériau à l'état solide en fonction de la déformation [140].

Pour répondre aux impacts balistiques de niveau III et IV de la norme NIJ 0101-06 [31], deux types d'armures de tissu ont été réalisés à partir d'un quadrillage de fils à mémoire de forme à base de Nickel-Titane (Nitinol) de 68 Tex (diamètre 0,25 mm) dans les directions chaîne et trame des tissus et des fils para-aramides de 1100 dTex (Twaron). Ces deux types de tissus ont été positionnés en face arrière des cibles, comme préconisé par Ellis [143], composées d'un assemblage de différents matériaux (Figure 127) pour subir une cuisson en autoclave à 125 °C sous 15 bars pendant 3 heures.

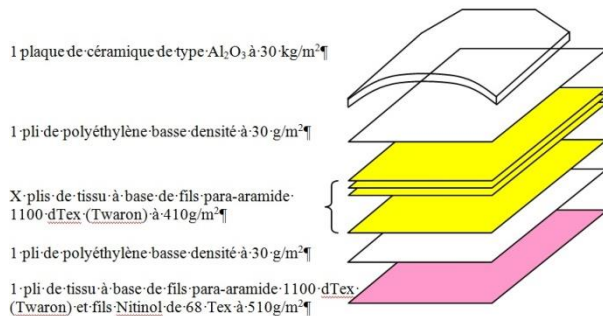
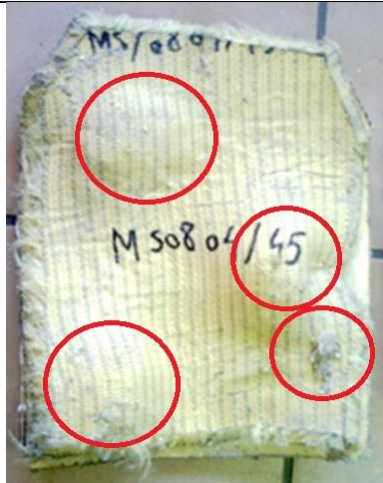



Figure 127. Description des différents composants de la cible à base de tissu para-aramide et Nitinol [133].

Les performances balistiques des cibles, à base de tissu de para-aramide et de Nitinol positionné en face arrière, ont permis d'arrêter les projectiles de type 7,62 mm non perforants (9,7 g à 838 m/s) lors de multi-impacts (niveau III) et la munition 7,62 mm perforante (10,8 g à 868 m/s) lors d'un mono-impact (niveau IV) (Tableau 26). Cependant, les déformées dynamiques des cibles mesurées après impact, sur l'empreinte du cratère laissé sur la plastiline lors de l'essai balistique ainsi que sur les cibles elles-mêmes, révèlent une hauteur de pénétration du projectile supérieure à la valeur autorisée de 44 mm prévue par la norme NIJ 0101-06.

Tableau 26. Observation des cibles à base de tissu para-aramide/ Nitinol après impact balistique de niveau III et niveau IV de la norme NIJ 0101-06 [31].

Type d'essais selon la norme NIJ 0101-06 [31]	Masse de la cible (kg)	Performance balistique	Vue en face arrière de la cible après impact
Niveau 3: multi-impacts (6 projectiles) de balles de 7,62 mm non perforantes de 9,7 g vitesse à 838 m/s	3,35	Arrêt des projectiles Déformée dynamique supérieure à 44mm pour les deux derniers tirs.	
Niveau 4: mono-impact d'une balle de 7,62 mm perforante de 10,8 g vitesse à 868 m/s	3,33	Arrêt du projectile Déformée dynamique supérieure à 44mm.	

Comme l'ont constaté ultérieurement Ellis et al. [144], les fils à mémoire de forme de type Nickel-Titane ne contribuent pas à absorber l'énergie d'impact aux vitesses des projectiles des niveaux III et IV de la norme NIJ 0101.06 [31] en raison de leur faible valeur de réactivité sous déformation dynamique rapide.

## B. Gilet pare balles intégrant des hybridations de structures textiles.

Dans le cadre des travaux de Purushothaman et al. [145], le recours à l'assemblage de matériaux de nature différente, tels que : du cuir, du non tissé aiguilleté et des multi-couches de tissus; permet de répondre à la fois à de la protection balistique et à de la protection à la coupure. De la même façon, l'assemblage par couture en losange de multi-couches de tissus secs et enduits de caoutchouc naturel a permis d'obtenir de meilleures performances à l'impact balistique pour des tirs au niveau IIIA de la norme NIJ 0101.06 [31] (407 à 420 m/s) et de réduire la valeur de la déformée dynamique après impact par rapport à des assemblages de tissus non cousus [146].

Ainsi, dans le cadre de nos travaux de recherche [147][148][149], nous avons assemblé différentes structures textiles (non tissé et tissus), dont un tissu 3D interlock chaîne à base de fils para-aramide de 840 dTex (Twaron) de type Interlock A - Liège L 1-2-8 avec fils de chaîne de surface (Figure 128), pour les soumettre à deux types d'impacts (balle de 9mm et FSP 5,4 mm) selon la norme STANAG 2920 [34] et de mesurer les performances balistiques par la vitesse V50 (la probabilité estimée de perforation est de 0,5) et la déformée dynamique des cibles ou BFS (Back Face Signature) [47][48].



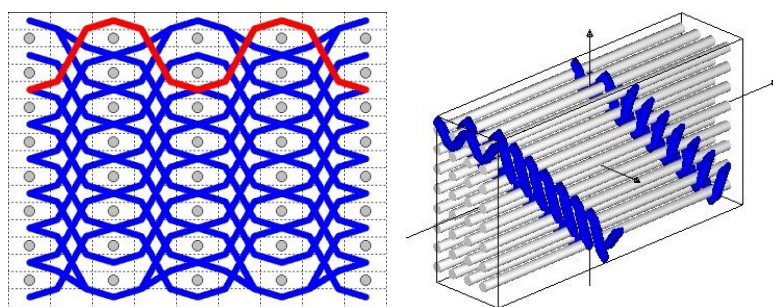


Figure 128. Représentations 2D et 3D du tissu Interlock A - liage L 1-2-8 avec fils de chaîne de surface.

L'assemblage de matériau à propriétés mécaniques et physiques différentes lors d'une sollicitation dynamique de type impact apporte à la cible finale un comportement hybride d'absorption d'énergie, segmenté par les différentes couches de matériaux utilisées. Nous avons donc considéré différents matériaux textiles souples, tels que :

- le non tissé à base de fibres de para-aramides pour la valeur de son module en compression dans l'épaisseur nous permettant de diminuer la valeur de la déformée dynamique après impact [147].
- l'assemblage de 5 couches de tissus de para-aramide Kevlar 29 par couture suivant un quadrillage de  $5 \times 5$  cm dont le nombre de couches, la forme et la dimension du type de couture a permis de révéler un meilleur comportement à l'impact de munitions de type 9 mm de niveau IIIA de la norme NIJ 0101.06 [31] par rapport à d'autres types de couture {(losange; carré)}( $2 \times 2$ ;  $5 \times 5$ ;  $10 \times 10$ ) [147].
- un tissu 3D interlock chaîne à base de fils para-aramide de 840 dTex (Twaron) de type Interlock A -Liage L 1-2-8 avec fils de chaîne de surface présentant de meilleure perforation à l'impact d'une bille de 10mm de diamètre (5,04 g) à 900 m/s que les deux autres types : Interlock O - liage T 1-7-7 avec fils de chaîne de renfort et Interlock A - Liage T 9-5-5 avec fils de chaîne de renfort et base sergé façonné de 10 effet trame cordon à droite [148].

A partir de ces matériaux, différents assemblages ont été réalisés pour aboutir à une masse surfacique de  $5,07 \text{ kg/m}^2$  (Tableau 27).

Tableau 27. Composition des différentes cibles à base de matériaux textiles assemblés par couche.

Référence des cibles	Composition des cibles
PW DQ $5 \times 5$ + Felt	X <sub>1</sub> plis de 5 couches de tissus de para-aramide Kevlar 29 cousus selon un quadrillage de $5 \times 5$ cm (PW DQ $5 \times 5$ ) Y <sub>1</sub> plis de non tissé de fibres para-aramides (Felt)
PW DQ $5 \times 5$ + 3D LtL + Felt	X <sub>2</sub> plis de 5 couches de tissus de para-aramide Kevlar 29 cousus selon un quadrillage de $5 \times 5$ cm (PW DQ $5 \times 5$ ) Y <sub>2</sub> plis de tissu Interlock A - liage L 1-2-8 avec fils de chaîne de surface à base de fils de para-aramide 840 dTex (Twaron) (3D LtL) Z <sub>2</sub> plis de non tissé de fibres para-aramides (Felt)
3D LtL + PW DQ $5 \times 5$ + Felt	X <sub>3</sub> plis de tissu Interlock A - liage L 1-2-8 avec fils de chaîne de surface à base de fils de para-aramide 840 dTex (Twaron) (3D LtL) Y <sub>3</sub> plis de 5 couches de tissus de para-aramide Kevlar 29 cousus selon un quadrillage de $5 \times 5$ cm (PW DQ $5 \times 5$ ) Z <sub>3</sub> plis de non tissé de fibres para-aramides (Felt)
PW DQ $5 \times 5$ + 3D LtL + Felt + PW DQ $5 \times 5$	X <sub>4</sub> plis de 5 couches de tissus de para-aramide Kevlar 29 cousus selon un quadrillage de $5 \times 5$ cm (PW DQ $5 \times 5$ ) Y <sub>4</sub> plis de tissu Interlock A - liage L 1-2-8 avec fils de chaîne de surface à base de fils de para-aramide 840 dTex (Twaron) (3D LtL) Z <sub>4</sub> plis de non tissé de fibres para-aramides (Felt) Q <sub>4</sub> plis de 5 couches de tissus de para-aramide Kevlar 29 cousus selon un quadrillage de $5 \times 5$ cm (PW DQ $5 \times 5$ )

Nous pouvons constater (Figure 129 - gauche) que seule la cible référencée (3D LtL + PW DQ  $5 \times 5$  + Felt) possède une valeur de V50 de 575,9 m/s sous impact FSP 5,4 mm (masse 1,1 g) selon la norme STANAG 2920 [34], supérieure à l'objectif initial de 550 m/s, par le positionnement en face avant du tissu Interlock A - liage L 1-2-8 avec fils de chaîne de surface à base de fils de para-aramide 840 dTex (Twaron) (3D LtL), montrant ainsi une performance balistique supérieure par rapport aux autres cibles.

Par contre la valeur de la déformée dynamique après impact (BFS) de cette même cible référencée (3D LtL + PW DQ  $5 \times 5$  + Felt) est de 32,1 mm (valeur supérieure à l'objectif initial de 25 mm) montrant ainsi plus de déformation sous sollicitation dynamique que la cible plus rigide référencée (PW DQ  $5 \times 5$  + Felt) de valeur de BFS égale à 27,3 mm (Figure 129 - droite).

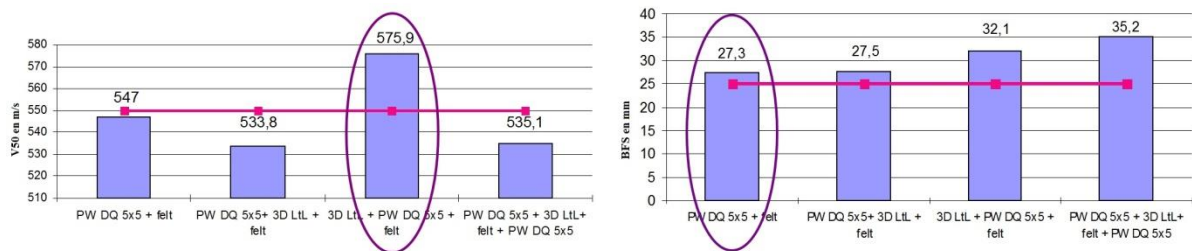


Figure 129. Comparaison des 4 cibles selon : (gauche) la vitesse V50 en m/s d'un FSP de 20 mm - (droite) la déformée dynamique après impact (BFS) en mm.

L'hybridation de matériaux textiles face aux différentes menaces (FSP de 5,4 mm et munition de 9 mm) contribue plus ou moins selon les critères utilisés (V50 ou BFS) à l'amélioration de la performance balistique pour une même masse surfacique de cible dans le développement de nouvelles solutions de protection de type gilet pare-balles; mais reste néanmoins difficile à identifier en raison du nombre important d'essais à réaliser pour comprendre la part de chaque matériau dans le mécanisme d'absorption de l'énergie cinétique d'impact.

### C. Gilet pare-balles adapté à la morphologie féminine

Dans les travaux de Singletary et al. [150], les performances balistiques des tissus 3D interlock chaîne par rapport aux multicouches de tissus cousus dans l'épaisseur ont été révélées, notamment par la contribution des fils de chaîne de liage et leur nombre par unité de volume. Selon ces mêmes auteurs, ce type de tissu 3D interlock chaîne peut s'avérer être une solution nouvelle pour la confection de gilet par balles à morphologie féminine, évitant ainsi les coutures d'assemblage ou l'ajout d'implant rigide. En complément de cette proposition, Chen et al. [151], ont souligné l'intérêt de la déformabilité multidirectionnelle du tissu 3D interlock chaîne pour la réalisation de gilet pare-balles à morphologie féminine et ont proposé un modèle de découpe géométrique des tissus à plat pour une mise en forme en 3D [152] à partir des dimensions relevées sur la poitrine. Cependant, les découpes nécessaires à la conception des plastrons issus des tissus 3D interlock chaîne à plat engendrent des zones de déchet de 20 à 30% de la surface totale, ce qui augmente considérablement la part du coût des matériaux fibreux dans le coût total du gilet.

Ainsi, dans le cadre de nos travaux de recherche [153][154][155][156][157], nous avons réalisé des gilets pare-balles à base de multi-couches de tissus 2D de para-aramides découpés et assemblés selon une disposition nouvelle des points de couture, afin de minimiser les découpes et le poids du gilet final par la réduction du nombre de plis de tissus, permettant une même performance à l'impact balistique d'une balle de 9 mm FMJ RN à 350 m/s de niveau II de la norme NIJ 0101.06 [31].

Chaque couche de tissu a fait l'objet d'une découpe selon la forme avant et arrière du plastron (Figure 130- gauche), puis la ligne de découpe de la forme avant du plastron a subi une rotation d'un angle de  $8,92^\circ$  à chaque nouvelle couche de tissu autour du centre situé à la pointe avant de la poitrine (Figure 130 - milieu), ce qui a permis de réaliser un assemblage par couture pour relier les plastrons avant et arrière pour chaque couche de tissu (Figure 130 - droite). Par la suite, les différents plastrons assemblés ont été enfilés les uns sur les autres pour former un gilet à base de multi-couches dont les lignes de couture des plastrons avant et arrière ne s'alignent pas suivant l'épaisseur, répartissant la zone de rupture des coutures lors de l'impact sur une surface plus importante.

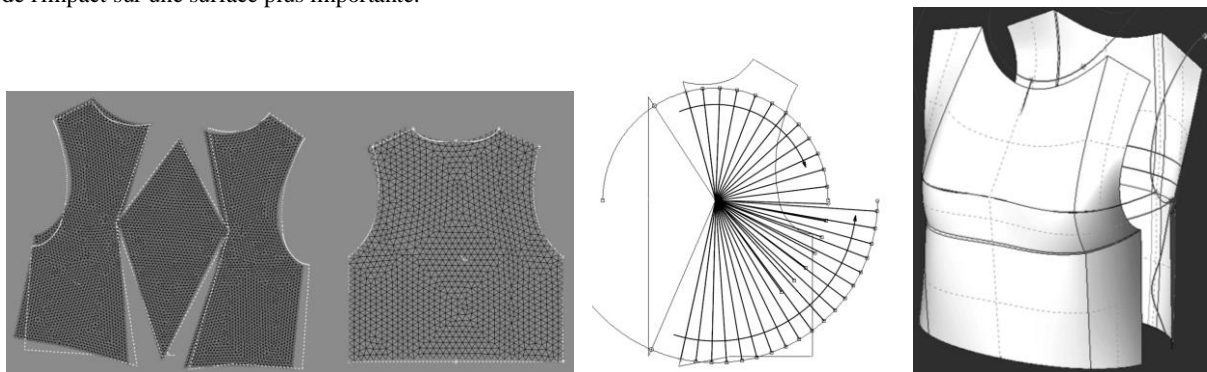


Figure 130. (gauche) plastrons avant et arrière découpés à plat avant assemblage - (milieu) rotation de la ligne de découpe pour chaque pli de tissu autour de la pointe avant de la poitrine - (droite) mise en forme 3D des plastrons avant et arrière du gilet pour un pli de tissu.

Par le biais de cette répartition des zones de couture, nous avons pu enlever deux plis de tissu par rapport au nombre initial de plis préconisé par Tong et al. [158] pour la réalisation d'un gilet pare-balles soumis à un impact de 9 mm FMJ à 350 m/s de niveau II de la norme NIJ 0101.06. Nous pouvons localiser les 6 points d'impacts sur la face avant du gilet (Figure 131- gauche) et visualiser les zones endommagées résultantes des points d'impact en face arrière du gilet (Figure 131- milieu), dont les empreintes des cônes de déformation du gilet peuvent être mesurées sur la plastiline de la cible de type Roma n°1 ayant une résilience sous déformation dynamique quasiment identique à celle de la chair humaine [159] (Figure 131- droite).

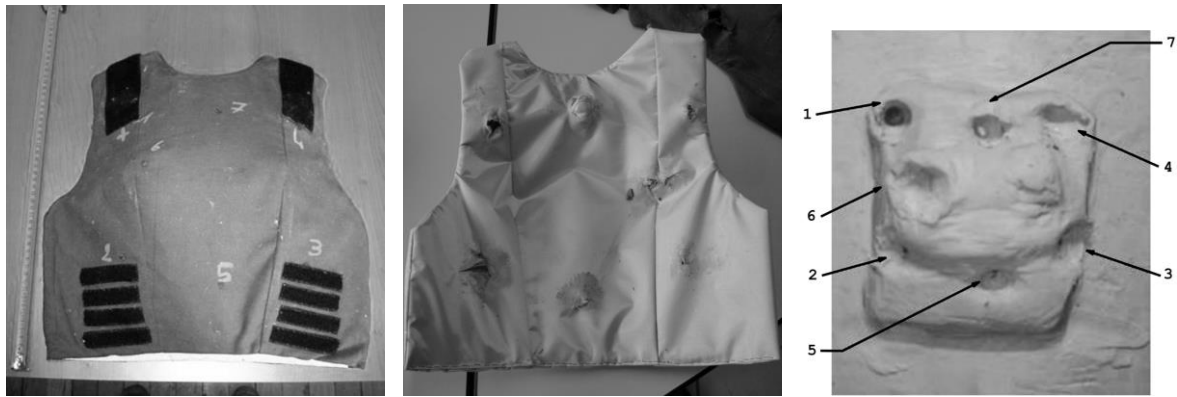


Figure 131. (gauche) face avant du gilet pare-balles avec la localisation des 6 points d'impact - (milieu) visualisation des zones déformées en face arrière du gilet - (droite) empreintes des déformées dynamiques aux 6 points d'impact dans la plastiline Roma n°1.

Les résultats des tirs balistiques ont montré que 5 tirs sur 6 ont été stoppés à différentes valeurs du nombre de couches de tissus pour différentes vitesses d'impact mesurées, et ont permis de mesurer les profondeurs de pénétration ainsi que le diamètre à la base du cône de déformation du tissu en face arrière du gilet sur la plastiline (Tableau 28).

Tableau 28. Résultats des essais de tirs de balles de 9 mm FMJ RN à 350 m/s du niveau II de la norme NIJ 0101.06 [31] et mesures des déformées dynamiques dans la plastiline Roma n°1.

Numéro impact	Vitesse d'impact mesurée (m/s)	Arrêt du projectile	Profondeur (mm)	Diamètre (mm)	Nombre de couches perforées
1	355	No			
2	358	Yes	21	60	2
3	352	Yes	30	70	4
4	356	Yes	32	70	4
5	351	Yes	30	60	3,5
6	362	Yes	30	70	7,5
7	358	Yes	35	45	5

La valeur moyenne de la profondeur d'impact est de 30 mm ce qui constitue une valeur bien inférieure à la valeur de la norme NIJ 0101.06 de 44 mm, montrant ainsi la capacité d'absorption d'énergie à l'impact plus élevée de cette conception de gilet pare-balles. Néanmoins, ce premier prototype de gilet adapté à la morphologie féminine nécessite de nombreuses améliorations, notamment en termes de maintien des couches de tissus sur les bords du gilet afin d'éviter les glissements des plis conduisant à la perforation du gilet lors du premier impact. Une amélioration du système de pression, appliquée sur le corps humain par le gilet, peut réduire les zones de non contact, ce qui favorise l'utilisation de la totalité de la surface du corps humain lors de l'impact et contribuerait à réduire de quelques millimètres la valeur de la profondeur de la déformée dynamique.

#### D. Conclusion sur les solutions de protection souple à l'impact

Dans le cadre des travaux de recherche menés sur les solutions de protection souple à l'impact utilisant un matériau textile seul ou couplé avec un matériau céramique, nous avons identifié différentes architectures textiles, et notamment les tissus 3D interlocks chaines, pour répondre à l'impact des diverses menaces à différentes vitesses. La solution de l'empilement de tissus 2D à base de fils de para-aramide et de fils de Nickel-Titane, positionnés en face arrière d'une partie dure en céramique, a permis de révéler la capacité d'amortissement de la structure tissée lors de multi-impacts de projectiles de type 7,62 mm non perforante (9,7 g à 838 m/s) et mono-impact d'une munition de type 7,62 mm perforante (10,8 g à 868 m/s). Cependant les valeurs de la déformation arrière après impact se sont révélées supérieures à 44 mm, et donc non conformes, aux valeurs requises par les niveaux III et IV de la norme NIJ 0101-06 [31]. Pour une menace de type balle de 9 mm FMJ RN à 350 m/s du niveau II de la norme NIJ 0101-06 [31], la solution d'assemblage par couture des différents plastrons de tissu 2D à base de fils para-aramides a permis d'y répondre, tout en apportant une solution d'adaptation d'un gilet pare-balles à la morphologie féminine. Enfin, l'hybridation de solutions textiles comprenant notamment des tissus 3D interlocks chaines à base de fils para-aramides 840 dTex a permis de répondre à la menace d'un FSP de diamètre 5,4 mm (masse 1,1 g) selon la norme STANAG 2920 [34] à une vitesse V50 de 575,9 m/s (supérieure à la valeur de référence de 550 m/s). Par contre la valeur de la déformation arrière après impact de la solution textile obtenue est de 32,1 mm (valeur supérieure à l'objectif initial de 25 mm). Ce qui tend à montrer la difficulté à identifier des solutions ayant des capacités d'absorption de l'énergie d'impact, tout en ayant une capacité de déformation dynamique limitée, pour minimiser la hauteur de pénétration autorisée de l'ensemble projectile/protection souple dans le corps humain, en tant que solution de protection de type gilet pare-balles.

## IV. Synthèse

Dans le cadre des travaux de recherche menés sur les solutions de protection souple à l'impact, nous avons fourni une description du phénomène d'impact et de la déformation dynamique résultante d'une structure textile souple par le biais des résultats obtenus dans la littérature. Nous avons pu souligner le caractère déterminant de la valeur dynamique des paramètres des fils sur la précision des modèles analytiques ou numériques de simulation des structures tissées à l'impact. De ce fait, nous avons proposé une méthode de mesure de traction dynamique d'un fil seul reposant sur un procédé de type SFB (Split Flying Bar). En reprenant les études issues de la littérature et selon nos propres observations, nous avons souligné les différents paramètres influents sur la performance de protection balistique d'une solution, tels que : la vitesse d'impact, la géométrie du projectile, l'angle d'impact du projectile sur la cible, la géométrie du tissu et le mode de fixation du tissu lors des essais. Sur la base de ces paramètres influents, nous avons identifié les modèles de comportement dynamique d'un tissu à l'impact apportant une compréhension précise contribuant à l'absorption de l'énergie cinétique initiale du projectile. Fort de cet éclairage issue de la littérature, nous avons proposé un modèle numérique de tissu 2D à deux échelles, macroscopique et mésoscopique, pour mesurer l'influence par simulation numérique des paramètres du fil suivants : coefficient de Poisson  $\nu_{12}$ , module d'Young transversal  $E_{22}$ , module de cisaillement  $G_{12}$ , coefficient de frottement inter-fils; mais aussi l'influence de la géométrie du tissu. Par la suite, nous avons mené différents travaux de recherche sur des tissus 3D interlocks chaines, soumis à différentes vitesses initiales d'impact d'une bille rigide, pour identifier les paramètres du tissu influents, tels que : l'homogénéité en terme de répartition entre les valeurs des densités des fils de chaîne et trame, le nombre de couches d'un tissu 3D interlock chaîne et le titrage des fils de chaîne et trame. Fort de ces connaissances, nous avons proposé trois solutions de protection souple à l'impact pour des applications de gilet pare-balles soumis aux différentes vitesses de divers projectiles.

Le développement de ce thème relatif au comportement à l'impact des structures textiles souples a été valorisé scientifiquement par :

- 9 publications [20][84][86][87][97][103][129][148][153],
- 30 communications [19][21][22][25][27][57][58][85][88][91][100][102][104][107][108][109][115][116][117][118][119][120][121][125][130][149][154][155][156][157],
- 4 thèses soutenues [8][9][10][131],
- 10 masters recherches soutenus [17][60][110][111][112][113][114][128][139][147],
- 1 thèse de doctorat en cours [11].

## V. Bibliographie

- [1] J. Hu, *3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structure*.: Woodhead publishing, 2008, vol. 74.
- [2] L Tong, AP Mouritz, and MK Bannister, *3D Fibre Reinforced Composite Materials*. London: Elsevier Applied Science, 2002.
- [3] S.Z. Sheng and S.V. Hoa, "Modelling of 3D Angle Interlock Woven Fabric Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 16, no. 1, pp. 45-59, 2003.
- [4] A.P. Mouritz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, and K.H. Leong, "Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, pp. 1445-1461, 1999.
- [5] K.H. Tsai, C.H. Chiu, and T.H. Wu, "Fatigue Behaviour of 3D Multi-Layer Angle Interlock Woven Composite Plates," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 241-248, 2000.
- [6] J. N. Baucom and M.A. Zikry, "Evolution of Failure Mechanisms in 2D and 3D Woven Composite Systems Under Quasi-Static Perforation," *Journal of Composite Materials*, vol. 37, no. 18, pp. 1651-1674, 01/01 2003.
- [7] Y. Tanzawa, N. Watanabe, and T. Ishikawa, ", « Interlaminar fracture toughness of 3-D orthogonal interlocked fabric composites," *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 8, pp. 1261-1270, juin 1999.
- [8] C. Ha-Minh, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 17/11/2011.
- [9] B. Provost, "Étude et Réalisation d'une solution à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," Université de Valenciennes, Valenciennes, France, Thèse de doctorat 14/01/2013.
- [10] M. Lefebvre, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules," Université de Valenciennes, Valenciennes, France, Thèse de doctorat 07/12/2011.
- [11] C. Chevalier, "Détermination des caractéristiques dynamiques des structures fibreuses," Université de Valenciennes, Valenciennes, France, Thèse de doctorat en cours début 01/10/2012.
- [12] S. Chocron et al., "Modeling and validation of full fabric targets under ballistic impact," *Composites Science and Technology*, vol. 70, pp. 2012-2022, 2010.
- [13] J.C Smith, F.L. Mc Crackin, H.F. Schiefer, W.K. Stone, and K.M. Towne, "Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading : 4 transverse impact tests," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 57, no. 2, pp. 83-89, 1956.
- [14] J.C. Smith, F.L. Mc Crackin, and H.F. Schniefer, "Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading. Part V. wave propagation in long textile yarns impacted transversely," *Textile research journal*, vol. 28, no. 4, pp. 288-302, 1958.
- [15] J. Rodriguez, I. S. Chocron, M.A. Martinez, and V. Sanchez-Galvez, "High strain rate properties of aramid and polyethylene woven fabric composites," *Composites: Part B*, vol. 27 B, pp. 147-154, 1996.
- [16] W. Dabboussi, F. Dooraki Babak, and J. A. Nemes, "High strain rate testing of yarns," Mc Gill University, Department of Mechanical

- Engineering, Report PW&GSC (Defence R&D Canada-Valcartier) contract n°: W7701-021651/001/QCA February 2003.
- [17] M. Guillot, "Caractérisation mécanique dynamique de multi-filaments," ONERA, Lille, France, Projet de fin d'études 2010.
  - [18] S. Lopatnikov, N. Schevchenko, and J.W. Gillepsie. (2012, January) Device and Method for Investigation of Mechanical Properties of Fibers under High-Strain Rate Tensile Load. [Online]. <http://arxiv.org/abs/1201.0916>
  - [19] J. Nussbaum, N. Faderl, R. Nusing, C. Ha-Minh, and F. Boussu, "Development of a new method to determine tensile strength of ballistic yarns," in *DYMAT 2012, 10th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour under Dynamic Loading*, 2012.
  - [20] C. Ha-Minh, T. Kanit, F. Boussu, and A. Imad, "Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact," *Computational Materials Science*, vol. 50, pp. 2172-2184, 2011.
  - [21] J. Nussbaum, N. Faderl, R. Nusing, C. Ha-Minh, and F. Boussu, "Development of a new method to determine dynamic tensile strength of ballistic yarns," in *EPJ Web of Conferences*, vol. 26, 2012.
  - [22] C. Chevalier, A. Klavzar, C. Kerisit, D. Coutellier, and F. Boussu, "Development of a new device for experimental study of the dynamic behaviour of ballistic yarns," in *TEXCOMP 11*, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
  - [23] I.S. Chocron Benloulou, J. Rodriguez, M.A. Martinez, and V. Sanchez Galvez, "Dynamic tensile testing of aramid and polyethylene fiber composites," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 135-146, 1997.
  - [24] V.P.W. Shim, C.T. Lim, and K.J. Foo, "Dynamic mechanical properties of fabric armour," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 1-15, 2001.
  - [25] C. Chevalier et al., "Dynamic mechanical behaviour of yarn under high speed loading," in *14th AUTEX conference*, Bursa, Turkey, 26 to 28 May 2014.
  - [26] A. Shahkarami, E. Cepus, R. Vaziri, and A. Poursartip, "Material responses to ballistic impact," in *Lightweight ballistic composites, Military and law-enforcement applications*. Abington, UK: Woodhead Publishing Limited, pp. 72-100.
  - [27] B. Provost, F. Boussu, J. Nussbaum, and M. Lefebvre, "Use of new warp interlock structures against high velocity impact," in *Personal Armour Systems Symposium*, Québec, Canada, September, 2010.
  - [28] C. Atas and O. Sayman, "An overall view on impact response of woven fabric composite plates," *Composite Structures*, vol. 82, pp. 336-345, 2008.
  - [29] J.A. Zukas, T. Nicholas, H.F. Swift, L.B. Greszczuk, and D.R. Curran, *Impact dynamics*, Wiley ed. New York, NJ, USA, 1982.
  - [30] KS Pandya, JR Pothnis, G. Ravikumar, and N.K. Naik, "Ballistic impact behavior of hybrid composites," *Materials and Design*, vol. 44, pp. 128-135, 28 February 2013.
  - [31] "Ballistic Resistance of Body Armor," Office of Science and Technology, National Institute of Justice, Washington, DC, NIJ Standard-0101.06 NCJ 223054, July 2008.
  - [32] ASTM, "ASTM F1233-08:2008 Standard test method for security glazing systems and materials," Norm 2008.
  - [33] US Army Research Lab, "MIL-STD-662F:1997 V50 Ballistic Test for Armour," Norm 1997.
  - [34] NATO Standardization Agency, "NATO STANAG 2920 PPS:2003 Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing. 2nd ed.," Brussels, Belgium, 2003.
  - [35] B.A. Gama and J.W. Gillespie Jr, "Punch shear based penetration model of ballistic impact of thick-section composites," *Composite Structures*, vol. 86, pp. 356-369, 2008.
  - [36] D. Starratt, T. Sanders, E. Cepus, A. Poursartip, and R. Vaziri, "An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, pp. 155-170, 2000.
  - [37] R.C. Tennyson and C. Lamontagne, "R.C. Tennyson, C. Lamontagne, Hypervelocity impact damage to composites," *Composites: Part A*, vol. 31, pp. 785-794, 2000.
  - [38] Z. Xuesen, "Numerical analysis of fabric armour under ballistic impact," National University of Singapore, Singapore, Malaysia, PhD thesis 2006.
  - [39] T.G. Montgomery, P.L. Grady, and C. Tomasino, "The Effects of Projectile Geometry on the Performance of Ballistic Fabrics," *Textile Research Journal*, vol. 52, pp. 442-450, 1982.
  - [40] G. Nilakantan, E.D. Wetzel, T.A. Bogetti, and G.W. Gillespie Jr, "A deterministic finite element analysis of the effects of projectile characteristics on the impact response of fully clamped flexible woven fabrics," *Composite Structures*, vol. 95, pp. 191-201, 2013.
  - [41] C.H. Cheong, "Effects of projectile geometry on the ballistic impact of high-strength fabric systems," National University of Singapore, Singapore, Malaysia, Master thesis 2002.
  - [42] C.K. Chu, Y.L. Chen, G.C. Hseu, and D.G. Hwang, "The Study of Obliquity on the Ballistic Performance of Basket Fabric Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, vol. 41, pp. 1539-1558, 2007.
  - [43] A. Rajagopal and N.K. Naik, "Oblique ballistic impact behavior of composites," *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 23, no. 4, pp. 453-482, 2014.
  - [44] P.M. Cunniff, "An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact," *Textile Research Journal*, vol. 62, no. 9, pp. 495-509, 1992.
  - [45] J.W. Song and B.L. Lee, "Fabrics and composites for ballistic protection of personnel," in *Lightweight ballistic composites, Military and law-enforcement applications*. Abington, Cambridge CB1, UK: Woodhead Publishing Limited, 2006, pp. 210-239.
  - [46] A.M. Sadegh and P.V. Cavallaro, "Ali M. Sadegh, Paul V. Cavallaro, Mechanics of Energy Absorbability in Plain-Woven Fabrics: An Analytical Approach," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 7, no. 1, pp. 11-25, 2012.
  - [47] D.J. Finney and F. Tattersfield, "Probit Analysis: A Statistical Treatment of the Sigmoid Response Curve," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, no. 260, pp. 687-691, 1952.
  - [48] H.J. Langlie, "A Reliability Test Method for "One-Shot" Items," Ford Aerospace Communications Corporation, Aeronautic Division, 1965.
  - [49] C.T. Lim, V.B.C. Tan, and C.H. Cheong, "Perforation of high-strength double-ply fabric system by varying shaped projectiles," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 27, pp. 577-591, 2002.



- [50] R.A. Prosser, "Penetration of Nylon Ballistic Panels by Fragment-Simulating Projectiles, Part II: Mechanism of Penetration," *Textile Research Journal*, vol. 58, no. 3, pp. 161-165, March 1988.
- [51] E.P. Gellert, S.J. Cimpoeu, and R.L. Woodward, "A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, pp. 445-456, 2000.
- [52] D.A. Shockey, D.C. Erlich, and J.W. Simons, "Lightweight fragment barriers for commercial aircraft," in *18th International Symposium on Ballistics*, 1999.
- [53] B.L. Lee, T.F. Walsh, S.T. Won, and H.M. Patts, "Penetration failure mechanisms of armor-grade fiber composites under impact," *Journal of Composite Material*, vol. 35, no. 18, pp. 1605-1633, 2001.
- [54] Y. Termonia, "Impact Resistance of Woven Fabrics," *Textile Research Journal*, vol. 74, pp. 723-729, 2004.
- [55] G. Nilakantan and S. Nutt, "Effects of clamping design on the ballistic impact response of soft body armor," *Composite Structures*, vol. 108, pp. 137-150, 2014.
- [56] X.S. Zeng, V.P.W. Shim, and V.B.C. Tan, "Influence of boundary conditions on the ballistic performance of high-strength fabric targets," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 631-642, 2005.
- [57] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Behaviour of a warp interlock fabric subjected to ballistic impact: experimental analysis,," in *12th AUTEX world textile conference*, vol. Book 1, section C, Zadar, Croatia, 13 to 15th June 2012, pp. 525-530.
- [58] J. Van Roey et al., "Continuous measurement of the projectile velocity during ballistic impact in flexible body armour," in *10th International Conference on Textile Composites*, Lille, France, October 26-28, 2010, pp. 299-305.
- [59] J. Van Roey, L. Rabet, A. Imad, and B. Reck, "An analysis of the projectile velocity decrease during the penetration of ballistic fabric," in *19th DYMAT Technical Meeting*, Strasbourg, France, 02 December 2010.
- [60] J. Maillet, "Développement d'une nouvelle solution balistique souple dans le cadre du projet EPIDARM," OUVRY, Lyon, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2008.
- [61] K.M.M. Kirkwood et al., "Yarn pullout as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in kevlar km-2 fabric : Part I : Quasi-static characterization of yarn pull-out," *Textile Research Journal*, vol. 74, pp. 920-928, 2004.
- [62] D.A. Shockey, D.C. Erlich, and J.W. Simons, "Improved barriers to turbine engine fragments : Interim report iii," U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of Aviation Research, Technical report 2001.
- [63] K.M. Kirkwood et al., "Yarn pullout as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in kevlar km-2 fabric : Part II : Predicting ballistic performance," *Textile Research Journal*, vol. 74, pp. 939-948, 2004.
- [64] K. Bilisik and M. Korkmaz, "Single and multiple yarn pull-out on E-glass woven fabric structures," *Textile Research Journal*, vol. 81, pp. 2043-2055, 2011.
- [65] S. Bazhenov, "Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric," *Journal of Materials science*, vol. 32, pp. 4167-4173, 1997.
- [66] V.B.C. Tan, C.T. Lim, and C.H. Cheong, "Perforation of high-strength fabric by projectiles of different geometry," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 28, pp. 207-222, 2003.
- [67] B.J. Briscoe and F. Motamedi, "The ballistic impact characteristics of aramid fabrics : the influence of interface friction," *Wear*, vol. 158, no. 1-2, pp. 229-247, 1992.
- [68] V.B.C. Tan, T.E. Tay, and W.K. Teo, "Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions," *Journal of Solids and Structures*, vol. 42, pp. 1561-1576, 2005.
- [69] Y.S. Lee, E.D. Wetzel, and N.J. Wagner, "The ballistic impact performance of kevlar woven fabric impregnated with a colloidal shear thickening fluid," *Journal of Material Science*, vol. 38, no. 13, pp. 2825-2833, 2003.
- [70] W. Denney Freeston JR and W.D. Claus JR, "Strain-Wave Reflections During Ballistic Impact of Fabric Panels," *Textile Research Journal*, vol. 43, pp. 348-351, 1973.
- [71] D. Roylance and S.S. Wang, "Penetration mechanics of textile structures," in *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*. New York, NJ, USA: Elsevier, 1980.
- [72] B. Parga-Landa and F. Hernandez-Illivares, "An analytical model to predict behavior of soft armors," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 16, pp. 455-466, 1995.
- [73] H.H. Billon and D.J. Robinson, "Models for the ballistic impact of fabric armour," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 25, pp. 411-422, 2001.
- [74] P.K. Porwal and S.L. Phoenix, "Modeling system effects in ballistic impact into multi-layered fibrous materials for soft body armor," *International Journal of Fracture*, vol. 135, pp. 217-249, 2005.
- [75] B.H. Gu, "Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile," *Composites Part B: Engineering*, vol. 34, pp. 361-371, 2003.
- [76] X. Chen, F. Zhu, and G. Wells, "An analytical model for ballistic impact on textile based body armour," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, pp. 1508-1514, 2012.
- [77] I.S. Chocron-Benloulou, J. Rodriguez, and V. Sanchez-Galvez, "A simple analytical model to simulate textile fabric ballistic impact behavior," *Textile Research Journal*, vol. 67, no. 7, pp. 520-528, 1997.
- [78] M. Mamivand and G.H. Liaghat, "A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, pp. 806-812, 2010.
- [79] Y. Hou, B. Sun, and B. Gu, "An analytical model for the ballistic impact of three dimensional angle interlock woven fabric penetrated by a rigid cylindro-spherical projectile," *Textile Research Journal*, vol. 81, no. 12, pp. 1287-1303, 2011.
- [80] D.L. Starratt, "An instrumented experimental study of the ballistic response of textile materials," The University of British Columbia, Vancouver, Canada, Master Thesis 1998.
- [81] V.B.C. Tan, V.P.W. Shim, and X. Zeng, "Modeling crimp in woven fabrics subjected to ballistic impact," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 561-574, 2005.
- [82] S.N.S. Nair and N.K. Naik, "Ballistic impact behavior of 2D plain weave fabric targets with multiple layers: Analytical formulation," *International Journal of Damage Mechanics*, pp. 1-35, February 2014.

- [83] M.P. Rao, G. Nilakantan, M. Keefe, B.M. Powers, and T.A. Bogetti, "Global/Local Modeling of Ballistic Impact onto Woven Fabrics," *Journal of Composite Materials*, vol. 49, pp. 445-467, 2009.
- [84] C. Ha-Minh, F. Boussu, A. Imad, T. Kanit, and D. Crepin, "Ha-Minh C., Boussu F., Imad A., Kanit T., Crepin D., Multi-scale model to predict the ballistic impact behavior of multi-layer plain woven fabrics," *International Journal of Computational Methods*, vol. 11, no. 3, pp. 1343011-1 to12, 2014.
- [85] C. Ha-Minh, F. Boussu, A. Imad, T. Kanit, and D. Crepin, "Multi-scale model to predict the ballistic behaviour of multi-layer plain woven fabrics," in *International conference on advances in computational mechanics (ACOME)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, August 14-16, 2012.
- [86] C. Ha-Minh, A. Imad, T. Kanit, and F. Boussu, "Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric," *International Journal of Mechanical Sciences*, 29 January 2013.
- [87] C. Ha-Minh, A. Imad, F. Boussu, T. Kanit, and D. Crepin, "On analytical modelling to predict the ballistic impact behaviour of textile multi-layer woven fabric," *Composite Structure*, 2012.
- [88] C. Ha-Minh, F. Boussu, and A. Imad, "Experimental and Numerical Investigation of a 3D Fabric Subjected to Ballistic Impact," in *4th World conference on 3D fabrics and their applications*, Aachen, Germany, September 10–12th, 2012.
- [89] D.S. Drumheller, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998, pp. 119–128.
- [90] G. Nilakantan, M. Keefe, J.W. Gillespie Jr., and T.A. Bogetti, "Novel multi-scale modeling of woven fabrics for use in impact studies," in *10th International LSDYNA Users Conference*, Dearborn, MI, USA, June 8–10, 2008.
- [91] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Effects of the mechanical transverse properties of bundles on the ballistic impact onto textile fabric: numerical modelling," in *19th DYMAT Technical Meeting*, Strasbourg, France, 02 December 2010.
- [92] Y. Mahadik and S.R. Hallett, "Finite element modelling of tow geometry in 3D woven fabrics," *Composite Part A*, vol. 41, no. 9, pp. 1192–1200, September 2010.
- [93] H. Lin, J. Wang, A.C. Long, M.J. Clifford, and P. Harrison, "Predictive modelling for optimization of textile composite forming," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 15, pp. 3242–3252, 2007, DOI 10.1016/j.compscitech.2007.03.040.
- [94] F. Stig and S. Hallstrom, "Spatial modelling of 3D-woven textiles," *Composite Structure*, vol. 94, no. 5, pp. 1495–1502, April 2012.
- [95] B. El Said, S. Green, and S. Hallett, "Kinematic modelling of 3D woven fabric deformation for structural scale features," *Composite Part A*, vol. 57, pp. 95-107, 2014.
- [96] H. Lin et al., "Multi-scale integrated modelling for high performance flexible materials," *Computational Material Science*, vol. 65, pp. 276–286, 2012.
- [97] C. Ha-Minh, A. Imad, F. Boussu, T. Kaint, and D. Crepin, "Numerical study on the effects of yarn mechanical transverse properties on the ballistic impact behavior of textile fabric," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 47, no. 7, pp. 524 - 534, 2012.
- [98] M. Cheng, W. Chen, and T. Weerasooriya, "Mechanical properties of Kevlar KM2 single fiber," *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 127, pp. 197–203, 2005.
- [99] M.P. Rao, Y. Duan, M. Keefe, B.M. Powers, and T.A. Bogetti, "Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric," *Composite Structures*, vol. 89, pp. 556-566, 2009.
- [100] C. Ha-Minh, F. Boussu, D. Crepin, T. Kanit, and A. Imad, "Dependence of dynamic behavior of 2D fabric on yarns mechanical transverse properties," in *SAMPE Tech 2012, Damage I Room 4, Charleston Convention center*, North Charleston, SC, USA, October 22-25 2012.
- [101] X.S. Zeng, V.B.C. Tan, and V.P.W. Shim, "Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 66, pp. 1309–1330, 2006.
- [102] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Effect of friction on ballistic impact of a 3D interlock woven fabric: numerical analysis," in *26th International Symposium on Ballistics*, Miami, USA, 12 to 16 September 2011.
- [103] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Effect of Frictions on the Ballistic Performance of a 3D Warp Interlock Fabric: Numerical Analysis," *Applied Composite Materials*, vol. 19, no. 3-4, pp. 333-347, June 2012.
- [104] C. Ha-Minh, F. Boussu, and K. Thorat Pierre, "Ktex\_Pattern: Numerical Tool for Textile Fabrics Submitted to Ballistic Impact," in *10th International Conference on Textile Composites*, Lille, France, October 26–28, 2010, p. Poster.
- [105] Altair Engineering Inc., "HyperMesh 10.0," 2009.
- [106] ALTAIR Engineering, "Radioss," theory manual 11.0 2011.
- [107] C. Ha-Minh, B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, and A. Imad, "Vers la géométrie réelle d'un tissu 3D interlock sur la précision de la simulation numérique à l'impact," in *CSMA 2013, 11ème Colloque National en Calcul des Structures*, Ghien, France, du 13 au 17 Mai 2013.
- [108] M. Lequin, E. Ferry, B. Provost, D. Coutellier, and F. Boussu, "Validation of a new numerical weaving tool highlighting the influence of real yarn positions and shapes on their behaviour under impact," in *13th AUTEX World Textile Conference*, Dresden, Germany, May 22nd to 24th 2013.
- [109] B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, M. Lequin, and K. Thorat-Pierre, "Improvements of ballistic simulations using a more realistic fibrous reinforcement modelling," in *TEXCOMP 11 Conference*, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [110] M. Lefebvre, "Structures 3D dans la lutte contre les IEDs," ISL, Saint Louis, France, Projet de fin d'études 2008.
- [111] B. Provost, "Développement d'un tissu balistique contre les fragments à haute vitesse," ISL, Saint Louis, France, Projet de fin d'études 2009.
- [112] J. Vilfayeu, "Recherche d'une nouvelle solution composite textile pour la protection contre les fragments engendrés par un IED," ISL, Saint Louis, France, Projet de fin d'études 2010.
- [113] M. Baudoin, "Nouvelle solution composite textile pour la protection contre les fragments engendrés par un IED," ISL, Saint-Louis, France, Projet de fin d'études 2011.
- [114] C. Chevalier, "Étude de l'influence de paramètres intrinsèques à un tissu interlock sur ses propriétés balistiques," ISL, Saint-Louis, France, Projet de fin d'études 2012.
- [115] C. Chevalier, F. Boussu, and J. Nussbaum, "3D warp interlock fabric as an efficient flexible solution for impact protection," in *LWAG*

2012 Lugano Workshop, *Opportunities and Challenges of Light-Weight Armour- Failure Mechanisms, Materials, Experiments and Modeling*, Lugano, Switzerland, October 25-26, 2012.

- [116] C. Ha-Minh et al., "Experimental investigations of the impact behavior of a warp interlock fabric," in *ICCE-19: 19th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering*, Shanghai, China, July 24-30, 2011.
- [117] J. Vilfayeu, F. Boussu, and J. Nussbaum, "3D flexible hybrid textile structures against high velocity impact," in *26th International Symposium on Ballistics*, Miami, FL, US, September 12-16, 2011.
- [118] F. Boussu et al., "High Capacity of Energy Absorption Impact of Multi Layer Structures Application to Aramid Warp Interlock Fabric," in *AUTEX 2009 World Textile Conference*, İzmir, Turkey, May, 26-29, 2009, pp. 692-698.
- [119] F. Boussu, M. Lefebvre, X. Legrand, and V. Koncar, "Efficiency of 3D-warp interlock fabrics to high speed impact," in *6th International Conference, Scientific Session II Technical Textiles*, Cairo, Egypt, April 5 – 7th, 2009.
- [120] M. Lefebvre and F. Boussu, "Behaviour of warp interlock structure under a high velocity steel ball impact," in *Second Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation, Textile Composites Workshop*, Casablanca, Morocco, November 2009 the 12 – 14th.
- [121] M. Lefebvre and F. Boussu, "High Energy absorption of Warp Interlock Fabrics: Application to high speed impact of fragments," in *DYMAT 2009, 9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, Brussels, Belgium, 7 – 11 September 2009.
- [122] B. Zahid and X. Chen, "Impact evaluation of Kevlar-based angle-interlock woven textile composite structures," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 32, no. 12, pp. 925-932, 2013.
- [123] K. Luan, B. Sun, and B. Gu, "Ballistic impact damages of 3-D angle-interlock woven composites based on high strain rate constitutive equation of fiber tows," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 57, pp. 145-158, 2013.
- [124] E. Wu and J. Wang, "Behavior of Stitched Laminates under In-Plane Tensile and Transverse Impact Loading," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, pp. 2254-2279, 1995.
- [125] C. Chevalier, J. Nussbaum, and F. Boussu, "Experimental Study on the Influence of Weaving Parameters on the Ballistic Performances of 3D Fabrics," in *International Ballistic Symposium*, Freiburg, Germany, 22 to 26 April 2013.
- [126] C.A. Couldrick, "A systems approach to the design of personal armour for explosive ordnance disposal," Cranfield University, College of Defence technology, engineering systems department, Cranfield, UK., Engineering Thesis November 2004.
- [127] B.Z. Haque Gama, M.M. Kearney, and J.W. Gillepsie, "Advances in Protective Personnel and Vehicle Armors, ," *Recent Patents on Materials Science*, vol. 5, pp. 103-134, 2012.
- [128] S. Taing, "Amélioration des performances d'un gilet discret contre les balles et coups de couteaux et diminution du trauma arrière," PROTECOP, Bernay, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2007.
- [129] V. Koncar and F. Boussu, "Flexible Displays on Textiles for Personal Protection," in *Intelligent Textiles for Personal Protection and Safety NATO security through science series. D: information and communication security*, S. Jarayaman, P. Kiekens, and A.M. Grancaric, Eds.: IOS press, 2006, vol. 3, pp. 65-88.
- [130] J. Codina, "Développement d'une tenue pare-coups pour le maintien de l'ordre," Groupe MARCK, Argenteuil, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2011.
- [131] J. Van Roey, "Étude du comportement dynamique des matériaux granulaires et tissés: approche expérimentale et simulation numérique," Ecole Royale Militaire, Bruxelles, Belgique, Thèse de doctorat 16/12/2011.
- [132] E. Patoor and M. Berveiller, *Technologie des alliages à mémoire de forme*, Traité des Nouvelles Technologies – série matériaux ed.: Hermes, 1994.
- [133] Niti Alloy Company. (2014, June) Shape memory alloy wire. [Online]. <http://www.sma-mems.com>
- [134] T.C. Kiesling, "Impact failure modes of graphite epoxy composites with embedded superelastic Nitinol," Mechanical Engineering Department, VPI & SU, Blackburg, VA, USA, Master Thesis 1995.
- [135] T.C. Kiesling, Z. Chaudhry, J.S.N Paine, and C.A. Rogers, "Impact failure modes of thin graphite epoxy composites embedded with superelastic Nitinol," in *37th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference*, Salt Lake City, Utah, USA, April 15-17, 1996, pp. 1448-1457.
- [136] S. Merlier and J-L. Petitniot, "Caractérisation et modélisation de l'amortissement de fils d'alliages à mémoire de forme," Université de Lille 1, Lille, France, Rapport de stage MST Juin 1997.
- [137] S. Bourasseau, S. Merlier, and J-L. Petitniot, "Caractérisation et modélisation de l'amortissement de fils d'alliage à mémoire de forme," ONERA, DMSE/RCS, Rapport technique RT n°99/42, Octobre 1999.
- [138] D. Joly and J-L. Petitniot, "Etude de l'effet amortissant de fils d'AMF dans des poutres en composite verre-époxy," ONERA, DMSE/RCS, Rapport Technique RT n°99/29, Août 1999.
- [139] S. Lecomte, "Etude de matériaux composites à base de tricots et d'un tissu mixte alliage à mémoire de forme et Aramide," MS COMPOSITES, Liévin, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2004.
- [140] J.V. Humbeeck, J. Stoiber, L. Delaey, and R. Gotthardt, "The High Damping Capacity of Shape Memory Alloys," *Z. Metallkd*, vol. 86, pp. 176-183, 1995.
- [141] L. Planckaert, J-L. Petitniot, and E. Deletombe, "Optimisation des structures aéronautiques par déformations réversibles et préprogrammées – Etude numérique et expérimentale d'éléments structuraux en alliage à mémoire de forme," ONERA, Lille, France, Rapport Technique RT n°98/51, décembre 1998.
- [142] N. Koeda et al., "Damping Properties of Ductile Cu-Al-Mn-Based Shape Memory Alloys," *Materials Transactions*, vol. 46, no. 1, pp. 118-122, 2005.
- [143] M.R.L. Ellis, "Ballistic impact resistance of graphite epoxy composites with shape memory alloy and extended chain polyethylene spectra hybrid components," Mechanical Engineering, Blackburg, VA, USA, Master's Thesis December 1996.
- [144] R.L. Ellis, F. Lalande, H. Jia, and C.A. Rogers, "Ballistic Impact Resistance of SMA and Spectra Hybrid Graphite Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 17, pp. 147-164, 1998.
- [145] A. Purushothaman, G. Coimbatore, and S.S. Ramkumar, "Soft Body Armor for Law Enforcement Applications," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 8, no. 2, pp. 97-103, 2013.

- [146] A. Mohd Rozi, Y. Wan, A. Wan, S. Jamil, and S. Azemi, "Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems," *Materials and Design*, 2007.
- [147] J. Maillet, "Développement d'une nouvelle solution balistique souple dans le cadre du projet EPIDARM," OUVRY, Lyon, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2008.
- [148] J. Maillet, M. Lefebvre, F. Boussu, and M. Piriot, "Innovative 3D textile structure for soft body armor protection, EPIDARM project," in *Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC Protection*. Split, Croatia: ASI NATO, August 31, 2011, p. 350.
- [149] F. Boussu and J. Maillet, "Innovative 3D textile structure for soft body armour protection," in *NATO Advanced Study Institute "Defence Related Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC (Nuclear, Biological, Chemical) Protection*, Split, Croatia, Tuesday 6th April to Friday 16th April 2010.
- [150] J. Singletary and A. Bogdanovich, "3-D Orthogonal Woven Soft Body Armor," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 29, no. 4, pp. 287-305, January 2000.
- [151] X. Chen and D. Yang, "Use of 3D Angle-Interlock Woven Fabric for Seamless Female Body Armor: Part 1: Ballistic Evaluation," *Textile Research Journal*, vol. 80, no. 15, pp. 1581-1588, September 2010.
- [152] X. Chen and D. Yang, "Mathematical Modeling Use of Three-dimensional Angle-interlock Woven Fabric for Seamless Female Body Armor: Part II," *Textile Research Journal*, vol. 80, no. 15, pp. 1589-1601, September 2010.
- [153] F. Boussu and P. Bruniaux, "Customization of a lightweight bullet proof vest for the female form," in *Advances in military textiles and personal equipment*.: Woodhead Publishing, 2012, ch. Part II, pp. 167-195.
- [154] P. Bruniaux, I. Cristian, and F. Boussu, "State of the art and new perspective on ballistic vest design," in *Technical Textiles – Present and Future Symposium*, Iasi, Romania, 21-22 October 2011.
- [155] A. Cichocka, M. Kulinska, P. Bruniaux, and F. Boussu, "Ballistic Body Armor Project for Women," in *AUTEX 2009 World Textile Conference*, Izmir, Turkey, May 26-29, 2009, pp. 773-778.
- [156] J. Maillet, M. Kulinska, A. Cichocka, P. Bruniaux, and F. Boussu, "A ballistic vest for women," in *LWAG 2009 Conference, Security and use of innovative technologies against terrorism*, Aveiro, Portugal, May 18-19, 2009.
- [157] F. Boussu, A. Ragot, M. Kulinska, X. Legrand, and P. Bruniaux, "Customization of a lightweight ballistic vest," in *Futurotextiel 08, 2nd International scientific conference "Textiles of the Future"*, Kortrijk, Belgium, 13 – 15 november 2008.
- [158] L. Tong, A-P. Mouritz, and M-K. Bannister, *3D fibre reinforced polymer composites*.: Elsevier science, 2002.
- [159] B.P. Kneubuehl and M.J. Thali, "The evaluation of a synthetic long bone structure as a substitute for human tissue in gunshot experiments," *Forensic Science International*, vol. 138, no. 1-3, pp. 44-49, 17 December 2003.

# Thème 5. Comportement à l'impact des structures textiles composites

Le cinquième thème se focalise sur les solutions de protection dure à l'impact, intégrant notamment des matériaux composites seuls ou couplés à d'autres matériaux de type métallique ou céramique. Par le biais d'une analyse bibliographique complétée de nos observations de recherche, nous avons mis en évidence les paramètres endogènes des tissus 3D interlocks chaînes pouvant influencer sur le mode de comportement à l'impact. Sur la base de ces caractéristiques, nous avons identifié différentes solutions de protection dure, intégrant des matériaux composites, de renforts fibreux de type tissu 3D interlock chaîne de différentes architecture et composés de différents fils et résines, pour répondre aux impacts de diverses munitions à différentes vitesses.

## Sommaire

I.	Introduction .....	119
II.	Comportement à l'impact d'un renfort fibreux au sein d'une structure composite .....	119
	A. Description du phénomène d'impact sur structure composite .....	119
	B. Comportement à l'impact des tissus 3D interlocks chaînes.....	120
III.	Solutions de protection dure à l'impact.....	121
	A. Les structures textiles composites utilisées seules, de renfort fibreux imprégné de résine époxy et à base d'UD de polyéthylène à haut module, soumises à l'impact d'une munition perforante de type 7,62 × 51 mm AP WC (type AP8) (8,21 g) à 930 m/s .....	121
	B. Les structures textiles composites couplées à des matériaux métalliques ou céramiques pour former des solutions de protection dure .....	124
	1. Solution de protection composée de matériaux céramique et composite, de renfort fibreux imprégné de résine polyéthylène basse densité et à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant des fils polyéthylènes haut module (Spectra 900), soumise à l'impact d'une munition perforante de type 12,7 mm (43g) à 610 m/s .....	125
	2. Solution de protection composée de matériaux métallique et composite, de renfort fibreux résiné époxy à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant soit des fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex) ou soit des fils polyester aromatique Vectran (2×1650 dTex), soumise à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 630 m/s. ....	126
	3. Solution de protection composée de matériaux métallique et composite, de renfort fibreux imprégné de résine thermoplastique à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant des fils para-aramide et des fils polyéthylène basse densité, soumise à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54g) à 1600 m/s.....	130
	C. Conclusion sur les solutions de protection dure à l'impact .....	137
IV.	Synthèse .....	137
V.	Bibliographie .....	137



## I. Introduction

L'objectif général de ce thème consiste à mieux comprendre le mode de comportement à l'impact des structures textiles composites et à identifier les paramètres produits qui influent sur la performance balistique de la solution de protection dure. Fort de cette connaissance, fondée sur des expérimentations sur des structures textiles composites soumises à l'impact, nous pouvons identifier des solutions de protection dure adaptées aux différents besoins d'utilisation pour les diverses vitesses des différentes menaces. Les applications visées pour ce type de protection "rigide" permettent d'apporter de nouvelles solutions composites plus légères et toutes aussi performantes à l'impact de projectile. Selon les configurations demandées, soit le renfort fibreux au sein du composite est utilisé seul comme solution de blindage d'un véhicule ou soit en complément de la structure et du blindage métalliques pour stopper le projectile et contenir les débris résiduels lors de l'impact.

## II. Comportement à l'impact d'un renfort fibreux au sein d'une structure composite

L'étude du comportement à l'impact des matériaux composites à renfort fibreux a fait l'objet de nombreuses publications, dont plus de 500 sont référencées dans l'étude très complète sur les pièces composites structurales et de protection équipant l'hélicoptère de combat Tiger ARH (Armed Reconnaissance Helicopter) [1].

### A. Description du phénomène d'impact sur structure composite

Dans les travaux de recherche de Shahkarami et al. [2], les différents phénomènes agissant lors du comportement à l'impact d'un matériau composite à base de couche de tissus empilés sont recensés, tels que : le délaminage et la rupture de la matrice, la rupture des fils en cisaillement transverse et en traction dynamique, la rupture en cisaillement par le poinçonnement du projectile; ainsi que les différents paramètres des renforts fibreux influents sur ces phénomènes, tels que : le type de fils, la structure du fil et la sensibilité de sa vitesse de déformation, l'état de surface du fil et son coefficient de frottement, l'armure du tissu, le type de résine et la configuration d'empilement ou de consolidation des plis de tissus.

En complément des travaux précédents, Naik et al. [3] ont décomposé le mécanisme d'absorption d'énergie lors d'un impact sur un composite à base de tissus de verre en différentes parties, telles que : la déformation du tissu sous la forme d'un cône en face arrière, la traction dynamique des fils de chaîne et trame primaires (en contact avec la surface du projectile), la déformation des fils de chaîne et trame secondaires (en dehors du contact avec la surface du projectile), le délaminage des différents plis de tissus, la rupture de la résine, le poinçonnement et le frottement dû au projectile (Figure 132).

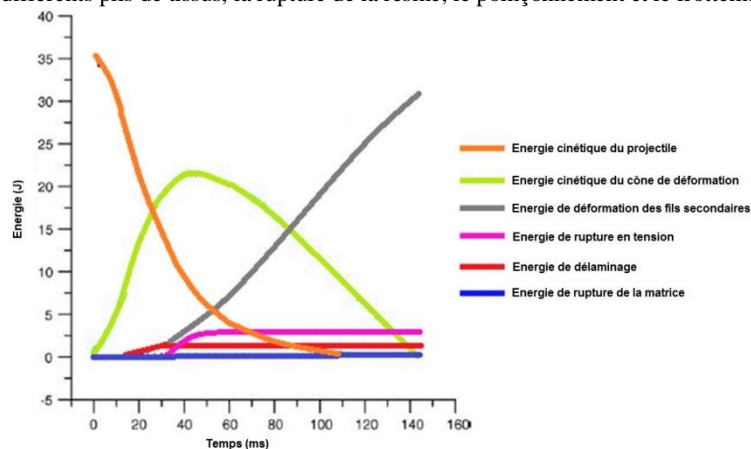


Figure 132. Décomposition des différents mécanismes d'absorption d'énergie par un impact à 158 m/s d'un projectile cylindrique (diamètre = 5 mm; hauteur = 2 mm; masse = 2,8 g) sur un laminé composite de tissus de verre E.

Il apparaît que la déformation conique des multi-couches de tissus de verre E couplée à la rupture en tension des fils primaires et la déformation des fils secondaires contribuent majoritairement à l'absorption d'énergie cinétique du projectile.

Dans des travaux supplémentaires de recherche de Naik et al. [4], une étude paramétrique sur des composites épais, fondée sur une approche analytique de décomposition de l'énergie d'impact et de transmission des ondes [5], a montré que le poinçonnement du projectile sur la cible contribue majoritairement à l'absorption d'énergie d'impact; ainsi que la résistance en compression du matériau situé sous la surface du projectile et le frottement transverse du projectile dans l'épaisseur de la cible composite. Les énergies de rupture de la matrice, du délaminage des différents plis de tissus, de la sollicitation en traction et compression des fils secondaires, n'apportent pas de contribution majeure à l'énergie d'impact. Pour une forme géométrique et masse de projectile données, l'épaisseur de la cible composite semble être un facteur déterminant dans l'optimisation du mécanisme d'absorption d'énergie pour une vitesse initiale proche de la vitesse limite de perforation.

L'observation plus locale effectuée par Gama Haque et al. [6], a permis de décomposer le modèle de pénétration d'un projectile dans l'épaisseur d'un matériau composite en deux étapes successives : l'une, de durée très courte durée, caractérisée par un choc de compression et représentée par une onde de choc uni-directionnelle au sein du matériau composite, et l'autre, d'une durée plus longue, correspondant à une phase de pénétration dynamique du projectile dans l'épaisseur du matériau

composite corrélée à, une courbe de résistance à la compression mesurée en vitesse quasi-statique par un coefficient dynamique mesuré semi-empiriquement.

Dans le cadre des travaux de recherche de Grujiric et al. [7], différentes solutions de blindage hybride composé d'assemblage successif d'une couche de tissu carbone/époxy de haute résistance et rigidité avec une couche de tissu para-aramide/époxy de haute ténacité et ductilité ont été testées numériquement à l'impact de type fragment FSP (Fragment Simulating Projectile). Il est souligné que la résistance à l'impact de la cible hybride, pour un même nombre de plis, est supérieure lorsque le pli de para-aramide/époxy est positionné en face avant de la cible.

Dans les travaux de recherche de Faur-Csukat [8], une étude comparative, sur des tissus d'architectures différentes à base de fils de carbone, de verre E et S, de para-aramide et de polyéthylène haut module, renforcés dans une matrice époxy et soumis à des tests d'impact à faible vitesse (Charpy et tour de chute) et haute vitesse (balistique), a permis de souligner le caractère influent des caractéristiques mécaniques du matériau fibreux, du type d'armures des tissus et de la propriété élastique de la résine. De façon complémentaire, Vielle et al. [9] ont réalisé une étude comparative de résistance à l'impact basse vitesse d'empilement de tissus à base de fils de carbone, imprégnés soit par résine époxy ou soit par résine PPS ou PEEK, et ont permis de révéler un meilleur comportement au délaminage et un endommagement réduit des laminés thermoplastiques que des laminés thermodurcissables.

Dans les travaux de recherche de Zhang et al. [10], les résultats d'essais balistiques, par des projectiles de forme cylindrique de 7,82 mm de diamètre à 700 m/s sur des laminés à base de tissus, des laminés unidirectionnels et des tissus 3D interlocks chaînes de type orthogonal à base de fils polyéthylène haut module, ont révélé des comportements différents selon l'épaisseur et l'architecture du renfort du composite. Dans le cas d'une faible épaisseur du composite, le mécanisme de rupture majoritaire est dominé par le poinçonnement et le frottement du projectile sur la cible. Dans le cas des composites à forte épaisseur, le délaminage des plis et la rupture en traction dynamique des fils contribuent majoritairement au mode de rupture de la cible composite.

Dans le cadre des travaux de recherche de Sanchez Paradel et al. [11], un modèle analytique a été développé pour simuler l'impact à haute vitesse sur des empilements de tissus de para-aramide Kevlar 29 par un fragment cylindrique (FSP) de masse 1,1g et de diamètre 5,3 mm pour des vitesses variant de 550 à 1400 m/s. Le modèle proposé est valable pour des cibles à faible épaisseur où le critère de rupture repose essentiellement sur la résistance à la traction des fils imprégnés dans le tissu résiné. Une différence de 10% entre les valeurs des vitesses résiduelles simulées et réelles du projectile est due à l'utilisation du module de Young des fils, mesuré à vitesse quasi-statique.

Dans le cadre des travaux de Morje et al. [12], un modèle de comportement à l'impact d'une bille (diamètre 5 mm, masse 0,68 g) à 512m/s sur différentes structures composites, telles que : des tissus à base de fil polyamide 6-6 ou de fils para-aramide avec une résine 50% formaldéhyde phénol/ 50% polyvinyle butadiène, des UD de polyéthylène haut module Dyneema UD66 avec une résine thermoplastique; a permis de décrire trois contributions majeures à l'absorption de l'énergie d'impact, respectivement : la rupture en traction dynamique, la déformation élastique et la quantité de mouvement des parties mobiles de la structure composite.

Parmi toutes ces études de recherche réalisées sur le comportement à l'impact d'un renfort fibreux au sein d'un matériau composite, nous avons souligné l'importance des propriétés mécaniques et dynamiques des fils, de la géométrie de la structure tissée ainsi que le type de résine utilisée. Par la suite, nous avons pris en compte ces indications et nous avons effectué différents travaux de recherche nous permettant de comprendre l'influence de ces différents paramètres sur le comportement à l'impact.

## B. Comportement à l'impact des tissus 3D interlocks chaînes

Plusieurs travaux de recherche ont souligné l'intérêt d'un liage dans l'épaisseur de renforts fibreux unidirectionnels ou tissés au sein de matériau composite pour augmenter la résistance à l'impact des cibles. Initialement, dans les travaux de recherche de Mouritz [13], l'intérêt du liage dans l'épaisseur par des fils de couture para-aramide Kevlar 49 sur des tissus de verre E imprégnés de résine vinyl-ester a été démontré lors d'un impact avec une onde de choc à 1500 m/s résultant d'une explosion, mais ne s'est pas révélé significatif lors d'un impact balistique à 900 m/s d'un projectile de forme sphérique. Cependant, dans les travaux de recherche de Wu et al. [14], l'influence de la densité des fils de couture de para-aramide Kevlar 29-3300 dTex sur un laminé d'épaisseur finale de 2,8 mm, à base de tissus de verre E résinés époxy, apparaît comme un élément majeur de la résistance aux impacts à faible vitesse par la réduction de la propagation du délaminage des plis suite à la formation initiale de fissures. Cependant, l'introduction de ces fils de couture crée une hétérogénéité de comportement en fonction de la position du point d'impact du projectile sur la structure. Sharma et al. [15], ont révélé que l'insertion d'un fil de couture de para-aramide dans l'épaisseur de structures laminées à base de tissus de verres résinés époxy contribue significativement à la réduction de la zone endommagée et apporte une plus grande résistance en compression après impact. De façon similaire, Kang et al. [16] ont montré expérimentalement que l'ajout d'un fil de couture dans l'épaisseur pour différents tissus, tels que : des tissus à base de fils de verre S2 résinés polyester, des tissus à base de fils de para-aramide résinés PCB-phénol et des tissus à base de fils de polyéthylène haut module résinés vinyle-ester; augmente les performances balistiques à l'impact de façon significative.

Dans les travaux de recherche de Hosur et al. [17], les fils de para-aramide cousus, dans l'épaisseur de 7 couches de tissus de carbone résinés époxy, selon deux dimensions de quadrillages différents (12,7 et 25,4 mm), ont permis de résister à une vitesse d'impact de 50J, sur une tour de chute, comparativement à la valeur maximale d'énergie d'impact de 40J pour la perforation de 7 couches de tissus de carbone résinés époxy, mais non cousus. Dans une étude similaire de Hosur et al. [18], les fils de para-aramide cousus, dans l'épaisseur de 5 couches de tissus de verre S2 résinés époxy, selon deux dimensions de quadrillages différents (12,7 et 25,4 mm), ont montré de meilleure performance à l'impact balistique que les 5 couches de tissus résinés mais non cousues, mesurée par une réduction de 60% de la zone endommagée en face arrière. La couture selon la dimension de quadrillage de 12,7 mm laisse apparaître un meilleur comportement à l'impact que la dimension de quadrillage de 25,4 mm.

Enfin, dans les travaux de recherche de Hazell et al. [19] et Appleby-Thomas et al. [20], une analyse récente des différents résultats de recherche sur les structures composites à l'impact haute vitesse a révélé la relative faible performance inter-couche des laminés à base de fils de carbone comparés aux laminés à base de fils de verre. Ils ont souligné le comportement intéressant de ces laminés placés en face arrière d'un matériau céramique à haute résistance pour absorber l'énergie d'impact de projectile de type fragments à haute vitesse propulsés par explosion; tout en portant une attention toute particulière aux tissus 3D interlocks chaines, ou aux structures laminés liées dans l'épaisseur, dont le comportement complexe à l'impact peut apporter des réponses tout à fait particulière, nécessitant une connaissance plus approfondie par simulation et expérimentation.

Ainsi, différents travaux de recherche ont porté spécifiquement sur le comportement à l'impact d'un tissu 3D interlock chaîne. Dont les travaux de recherche de Hou et al. [21] sur l'analyse et la mesure de la capacité d'absorption d'énergie d'un tissu 3D interlock chaîne d'angle lors d'impacts balistiques, révélant le caractère influent de l'architecture tissée et l'évolution de ses fils de chaîne de liage couplée aux densités des fils de chaîne et trame utilisées au sein du tissu.

Dans les travaux de recherche de Jia et al. [22], la comparaison des simulations à l'impact du modèle par éléments finis d'un tissu 3D interlock chaîne de type orthogonal avec les résultats expérimentaux ont permis de révéler le rôle important du fil de chaîne de liage assurant la cohésion de la structure tissée, mais ne contribue pas à l'absorption de l'énergie lors de l'impact comme les autres fils de chaîne et trame. Pour des faibles vitesses d'impact, Gerlach et al. [23] ont observé une meilleure résistance au délaminage à l'impact basse vitesse (de 3 à 12 m/s) pour des tissus 3D interlock chaîne de type angle - through-the-thickness à base de fils de carbone minimisant respectivement le nombre de fils de chaîne de liage dans l'épaisseur, l'embuvage des fils de chaîne de renfort et le retrait des fils de trame. De façon similaire pour Archer et al. [24], les fils de chaîne de liage d'un tissu 3D interlock chaîne de type angle à base de fils de carbone ont permis de maintenir la structure lors d'essais d'impact de 10 à 40 J, sur une tour de chute, évitant la décohésion des plis comme observée pour des structures de type laminés. Ainsi que dans le cadre des travaux de recherche de Wang et al. [25], le placement des fils de trame de para-aramide Kevlar 129-3140 dTex et Basalt 6144 dTex, soit par couches successives ou en quinconces entre les couches, dans un tissu 3D interlock chaîne de type orthogonal à liage through-the-thickness avec des fils de chaîne de renfort sur 7 couches, a révélé un meilleur comportement à l'impact faible vitesse (2 et 3 m/s) pour le placement par couches successives due à une hétérogénéité plus faible de la structure tissée que dans le cas d'une répartition en quinconce entre les couches. Pour Zahid et al. [26], l'épaisseur du tissu 3D interlock d'angle chaîne à base de fils para-aramides et résiné époxy contribue essentiellement à l'absorption d'énergie lors d'un impact, sur tour de chute, reproduisant l'énergie équivalente lors du tombé d'un marteau sur une pièce structurale.

En complément, les travaux de Luo et al. [27] ont montré que le tissu 3D interlock chaîne de type orthogonal avec fils de chaîne de renfort résiné possède des comportements identiques aussi bien dans le sens chaîne que dans le sens trame lorsqu'il est soumis à des impacts transverses réalisés sur barre Hopkinson, et aussi une absence de délaminage comparativement aux composites à base de laminés. Les simulations à l'impact, de Luan et al. [28], d'une bille rigide du modèle numérique de tissu 3D interlock chaîne de type d'angle ont révélé qu'une même quantité d'énergie a été consommée aussi bien dans le sens chaîne que dans le sens trame, et que les paramètres de l'architecture tissée contribue fortement à la capacité d'absorption de l'énergie cinétique d'impact. Enfin, dans l'étude de Baucom et al. [29], la porosité d'un tissu 3D interlock chaîne de type orthogonal avec fils de chaîne de renfort semble contribuer à l'absorption de l'énergie d'impact d'un projectile cylindrique de 19 mm de diamètre avec des vitesses initiales variant de 100 à 240 m/s.

### III. Solutions de protection dure à l'impact

Les composites textiles constituent l'une des solutions actuelles pour répondre au besoin de protection des véhicules à l'impact haute vitesse de divers types de projectiles, conventionnels ou improvisés, tout en minimisant le poids total du blindage [30] [31]. Les matériaux fibreux utilisés doivent être capables d'absorber une partie de l'énergie cinétique d'impact et permettre de conserver l'intégrité de la solution de protection de blindage suite à leur endommagement.

Dans l'étude prospective de Madhu et al. [32], les futures solutions de blindage des chars de combat seront composées de multi-matériaux comprenant des fonctions de défense passives et/ou actives face aux différentes menaces de type fragments haute vitesse et/ou ondes de choc issues d'explosion.

Ainsi, dans le cadre de nos travaux de recherche, différentes solutions textiles composites utilisées seules ou en complément de matériaux céramiques ou d'aciers à blindage ont été proposées pour répondre à des impacts de type balles perforantes ou fragments à haute vitesse (FSP).

#### A. Les structures textiles composites utilisées seules, de renfort fibreux imprégné de résine époxy et à base d'UD de polyéthylène à haut module, soumises à l'impact d'une munition perforante de type 7,62 × 51 mm AP WC (type AP8) (8,21 g) à 930 m/s

Dans le cadre de nos travaux de recherche [33][34][35][36], nous avons proposé une solution textile composite (UD pré-imprégné T700/résine époxy M10R) [37] à base de fils de carbone (T700-12k - 800 Tex) résinés époxy en tant que composant unique d'une solution de blindage soumise à l'impact d'une munition perforante de type 7,62 × 51 mm AP WC (type AP8) (de masse 8,21 g) à la vitesse initiale de 930 m/s. Sur la base du modèle analytique du comportement à l'impact d'un assemblage céramique/composite proposé initialement par Chocron et al. [38][39], que nous avons transposé au comportement d'un matériau composite seul, soumis à une forme conique de projectile; nous avons déterminé le nombre de couches d'UD à base de fils de carbone nécessaires pour répondre à l'impact de 930 m/s d'une balle de 7,62 × 51 mm AP WC (type AP8).

En considérant la force appliquée  $F$  à l'instant  $t$  par le projectile sur  $n_y$  fils en contact par couche sous  $n_1$  couches de renfort fibreux, nous obtenons la relation suivante [38] :

$$\text{Équation 11} \quad F = E \times S \times n_1 \times n_y \times \varepsilon(t)$$

avec :

$E$  : module de Young de la fibre (en MPa)

$\varepsilon(t)$  : déformation de la fibre

$S$  : section de la fibre ( $m^2$ )

$n_1$  : nombre de couches de renfort fibreux

$n_y$  : nombre de fils directement sous le projectile

En considérant que seule l'énergie cinétique du projectile est absorbée par l'énergie de déformation dynamique des fils en traction longitudinale lors de l'impact, nous obtenons la relation suivante [38] :

$$\text{Équation 12} \quad \frac{M_p \times V^2(t_0)}{2} - \frac{M_p \times V^2(t)}{2} = \frac{E \times S \times n_1 \times n_y \times c_y}{2} \int_0^t \varepsilon^2(t) dt$$

avec :

$M_p$  : masse du projectile (kg)

$V(t_0)$  : vitesse initiale du projectile à l'instant  $t = t_0$  (m/s)

$V(t)$  : vitesse du projectile à l'instant  $t$  (m/s)

$c_y$  : fréquence de propagation de l'onde du son dans le fil (Hz)

On définit l'instant  $t = T_{max}$ , correspondant à l'arrêt du projectile avec  $V(T_{max}) = 0$  m/s.

L'équation d'équilibre énergétique devient :

$$\text{Équation 13} \quad \frac{M_p \times V^2(t_0)}{E \times S \times n_1 \times n_y \times c_y} = \int_0^{T_{max}} \varepsilon^2(t) dt$$

En approximant la déformation du fil à l'instant par une fonction linéaire telle que :

$$\text{Équation 14} \quad \varepsilon(t) = t \times \frac{\varepsilon_{max}}{T_{max}}$$

En remplaçant  $\varepsilon(t)$  dans  $\int_0^{T_{max}} \varepsilon^2(t) dt$ , on obtient :

$$\begin{aligned} \int_0^{T_{max}} \varepsilon^2(t) dt &= \int_0^{T_{max}} t^2 \times \left( \frac{\varepsilon_{max}}{T_{max}} \right)^2 dt \\ \int_0^{T_{max}} \varepsilon^2(t) dt &= \left( \frac{\varepsilon_{max}}{T_{max}} \right)^2 \times \int_0^{T_{max}} t^2 dt \\ \int_0^{T_{max}} \varepsilon^2(t) dt &= \varepsilon_{max}^2 \times \frac{T_{max}}{3} \end{aligned}$$

La relation d'équilibre énergétique (Équation 13) devient :

$$\frac{M_p \times V^2(t_0)}{E \times S \times n_1 \times n_y \times c_y} = \varepsilon_{max}^2 \times \frac{T_{max}}{3}$$

Le nombre de couches limites est ainsi donné par la relation suivante :

$$\text{Équation 15} \quad n_1 = \frac{3 \times M_p \times V^2(t_0)}{E \times S \times n_y \times c_y \times \varepsilon_{max}^2 \times T_{max}}$$

A l'aide des observations des durées de perforation de cibles composites par le biais de caméra rapide, deux valeurs de temps  $T_{max}$  ont été retenues : 20 et 50  $\mu s$  [35].

En considérant un profil conique de projectile, tel que celui d'une balle de  $7,62 \times 51$  mm AP WC (type AP8), le nombre  $n_y$  de fils en contact avec le projectile évolue en fonction du temps au fur et à mesure de la pénétration de la munition dans les  $n_1$  couches du renfort fibreux. Par simplification, nous avons opté pour trois valeurs de diamètres fixes, correspondant respectivement aux valeurs de diamètre situées à  $1/3$ ,  $2/3$  et  $1$  fois la hauteur  $h$  du cône du projectile (Figure 133).

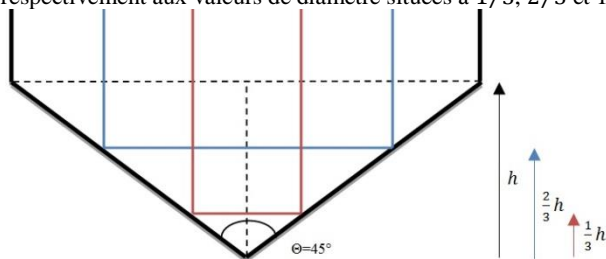


Figure 133. Valeurs des diamètres fixes de projectile à  $h$ ,  $\frac{1}{3}h$  et  $\frac{2}{3}h$  de la forme conique initiale de la balle  $7,62 \times 51$  mm AP WC (type AP8).

Pour la munition utilisée  $7,62 \times 51$  mm AP WC (type AP8), le diamètre du projectile  $d_h$  à la hauteur  $h$  est de 7,62 mm, puis  $d_{\frac{2}{3}h}$  à la hauteur  $\frac{2}{3}h$  est de 3,69 mm et  $d_{\frac{1}{3}h}$  à la hauteur  $\frac{1}{3}h$  est de 1,84 mm.

En considérant chaque valeur de diamètre de projectile aux trois hauteurs  $h$ ,  $\frac{2}{3}h$  et  $\frac{1}{3}h$ , nous avons pu calculer les nombres  $n_y$  de fils de carbone T700-12k (Tex 800, masse volumique =  $1,8 \text{ g/cm}^3$ ,  $\epsilon_{\max} = 2,1\%$ ,  $c_y = 10000 \text{ s}^{-1}$ ,  $E = 230 \text{ GPa}$ ) insérés dans un pli d'UD (pré-imprégné T700/résine époxy M10R) et en contact direct avec le projectile, tels que :

$$n_y(h) = 7,4; n_y\left(\frac{2}{3}h\right) = 4,9; n_y\left(\frac{1}{3}h\right) = 2,4$$

En utilisant l'Équation 15, nous avons pu calculer le nombre théorique  $n_1(th)$  de couches limites nécessaires pour stopper le projectile (Tableau 29), que nous avons arrondi à la valeur entière supérieure modulo 50 ( $n_1(real)$ ) suite à la production de panneau unique de 50 plis d'UD (Tableau 29) [35]. Enfin, la masse surfacique de chaque solution théorique a été également calculée en considérant que la masse surfacique d'un pli résiné est de  $411 \text{ g/m}^2$  avec un taux volumique de fibres égal à 73% (correspondant à un taux massique de fibres de 80% avec une masse volumique nominale de résine de  $1,2 \text{ g/cm}^3$ ).

Tableau 29. Nombre de couches théoriques de plis d'UD (pré-imprégné T700/résine époxy M10R) nécessaires pour stopper le projectile  $7,62 \times 51$  mm AP WC (type AP8) en fonction des paramètres de durée d'impact et de diamètre équivalent de projectile.

Diamètre équivalent du projectile à hauteur h (mm)	$d_h$	$d_h$	$d_{\frac{2}{3}h}$	$d_{\frac{2}{3}h}$	$d_{\frac{1}{3}h}$	$d_{\frac{1}{3}h}$
$T_{\max} (\mu s)$	50	20	50	20	50	20
$n_1(th)$ nombre théorique de couches d'UD	127	319	193	482	386	966
masse surfacique pour $n_1(th)$ couches d'UD ( $\text{kg/m}^2$ )	47,8	119,4	72,3	180,6	144,9	362,2
$n_1(real)$ Nombre de couches modulo 50 plis	150	350	200	500	400	1000

Dans le cadre de notre étude [35], seules 3 solutions, de dimensions  $300 \times 300$  correspondant à 3 valeurs de nombre de couches d'UD, respectivement : 300, 350 et 400; ont été testées à l'impact balistique par une munition de type  $7,62 \times 51$  mm AP WC (type AP8) (de masse 8,21g) pour une même valeur initiale de vitesse proche de 930 m/s (Tableau 30).

Tableau 30. Résultats des tirs sur l'observation de l'effet de masse

Vitesse mesurée à l'impact (m/s)	Nombre de couches $n_1(real)$ d'UD	Masse surfacique équivalente ( $\text{kg/m}^2$ )	Protection	Remarques
935	400	160	OUI	arrêt à 300 couches
924	350	140	OUI	arrêt à 300 couches
924	300	120	OUI	arrêt à 300 couches

Pour la solution à 300 plis d'UD, nous avons observé (Figure 134 - gauche), en face avant du 6<sup>ème</sup> panneau de 50 plis (correspondant aux numéros de plis d'UD 251 à 300), la pénétration des munitions de type  $7,62 \times 51$  mm AP WC (type AP8) pour les trois tirs successifs, sans érosion du noyau de la balle en carbure de tungstène. Cependant, la totalité de ces trois tirs successifs ont été stoppés par cette solution à 300 plis d'UD pour une masse surfacique équivalente à  $120 \text{ kg/m}^2$  et nous pouvons observer l'apparition d'un endommagement en face arrière de la cible lors du troisième impact (Figure 134 - droite).



Figure 134. Observations de la cible à 300 plis d'UD (pré-imprégné T700/résine époxy M10R) après impact à 924 m/s de 3 tirs de munition de type  $7,62 \times 51$  mm AP WC (type AP8) - (gauche) face avant - (droite) face arrière.

Pour les solutions à 350 et 400 plis, les projectiles ont tous été stoppés à partir du 6<sup>ème</sup> panneau de 50 plis (du 251 au 300<sup>ème</sup> plis), montrant ainsi que l'épaisseur de la cible ne modifie pas le comportement des panneaux de plis d'UD (pré-imprégnés T700/résine époxy M10R) à l'impact.

Par méthode inverse, si nous nous fixons le paramètre de 300 plis de la solution de protection, nous pouvons retrouver les valeurs de  $T_{\max}$ , correspondant à l'arrêt du projectile pour les 3 hauteurs de diamètre de projectile  $h$ ,  $\frac{2}{3}h$  et  $\frac{1}{3}h$  ainsi que la valeur de hauteur du projectile pour une valeur de  $T_{\max} = 50 \mu s$  (Tableau 31).



Tableau 31. Différentes valeurs de durée d'impact et de diamètre équivalent du projectile pour une solution à 300 plis d'UD (pré-imprégné T700/résine époxy M10R)

Solution à 300 plis d'UD	$h$	$\frac{2}{3}h$	$0,4285 h$	$\frac{1}{3}h$
$T_{max} (\mu s)$	21,3	32,1	50	64,5

Cependant, la difficulté de mesure de la durée d'impact sur une cible lors d'une protection, ne nous permet pas de vérifier les valeurs de temps  $T_{max}$  proposées pour différentes valeurs de diamètre équivalent de projectile.

Nous avons pu ainsi mettre en avant la difficulté de formuler un modèle analytique simple du comportement à l'impact d'un type de solutions textiles composites à base de fils de carbone T700-12k (800 Tex) et de résine époxy. Le nombre important de variables liées au projectile et à la structure textile composite limite l'approche analytique d'un modèle universel de comportement à l'impact. Cependant, en considérant les quelques paramètres descriptifs du projectile (diamètre, vitesse, forme ogive) et les structures textiles composites (fils, architectures et résines), nous pouvons envisager une classification des modes de comportement à l'impact en fonction de ces paramètres discriminants.

## B. Les structures textiles composites couplées à des matériaux métalliques ou céramiques pour former des solutions de protection dure

Différents travaux de recherche ont montré l'intérêt de coupler des matériaux de nature et de mode de comportement à l'impact différents pour former une solution de protection dure. Dans les travaux de Naik et al. [40], un modèle analytique a permis de comprendre les 4 étapes différentes de comportement, lors d'un impact de projectile cylindrique d'acier AISI 4340 (densité = 7,8 g/cm<sup>3</sup>, Module d'élasticité = 200 GPa, résistance à la compression = 3 GPa), d'une cible composée depuis sa face avant jusqu'à sa face arrière :

- d'une couche de composite à base de tissus de verre E/époxy (densité = 1,85 g/cm<sup>3</sup>, taux volumique de fibre = 50 %, Module d'élasticité dans le plan = 30,2 GPa, Module d'élasticité dans l'épaisseur = 14,8 GPa, résistance au poinçonnement = 90 MPa) pour contenir les débris de céramique générés lors de l'impact,
- d'une couche de carreaux de céramique de type Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (densité = 3,96 g/cm<sup>3</sup>, Module d'élasticité = 366 GPa, Résistance à la compression = 3900 MPa, Résistance au poinçonnement = 350 MPa) pour absorber l'énergie cinétique du projectile par sa valeur élevée de rigidité,
- d'une couche d'élastomère de type éthylène propylène-diène (densité = 1,34 g/cm<sup>3</sup>, Module d'élasticité = 4 GPa, Résistance au poinçonnement = 7 MPa, Taux d'allongement en compression = 18%) pour absorber l'onde de choc transmise lors du contact entre le projectile et le matériau céramique,
- d'une couche de composite à base de tissus de verre E/époxy pour absorber définitivement l'énergie cinétique restante du projectile par sa capacité à se déformer lors de l'impact.

Les mécanismes d'absorption de l'énergie cinétique du projectile sont principalement dus à l'érosion du projectile, le poinçonnement du matériau céramique et la traction dynamique du matériau composite, situé en face arrière. L'insertion d'un matériau absorbeur de type élastomère permet de réduire la concentration de contraintes localisées au point d'impact, mais induit une propagation non homogène de ces contraintes à l'interface des matériaux [41].

Dans des travaux similaires, Nayak et al. [42] ont étudié l'influence de l'ajout d'une couche en face arrière de matériau composite de type UD pré-imprégné de para-aramide Twaron sur l'amélioration très nette des performances balistiques à la munition 7,62 mm perforante (AP) à une couche de matériau céramique de type Alumine renforcée au Zirconium. La structure composite d'UD de para-aramide à base de résine polypropylène a permis d'obtenir des valeurs plus élevées de vitesse limite balistique que pour la même structure composite à base de résine époxy, principalement dues à ses capacités d'allongement et de délaminage plus importantes.

En complément des travaux précédents, Grogan et al. [43] ont montré l'intérêt des structures tissées 3D interlocks chaines à base de fils de verre S2, insérées entre des couches de tissus 2D, et positionnées en face arrière de carreaux de céramique de type alumine à l'impact d'une munition perforante de type M2 AP à 925 m/s. Les analyses des cibles après impact ont permis de révéler un contrôle du délaminage et de plus faibles pénétrations au sein des structures tissées 3D interlocks chaines comparées aux structures tissées 2D seules.

L'observation du délaminage intra couches de laminés de polyéthylène haut module Dyneema HB26, consolidés à deux valeurs de pression (165 et 300 bars) et soumis à l'impact d'un FSP de 20 mm à 950 m/s selon la norme STANAG 2920 [44], a permis de révéler l'influence de l'épaisseur du pli de colle entre les deux couches de laminés sur les performances des cibles, conduisant à une protection pour une faible valeur d'épaisseur et une perforation pour une valeur plus forte [45]. Dans une étude similaire, Cheeseman et al. [46] ont observé sur des laminés composites, en coupe après impact, que le mode d'absorption de l'énergie d'impact est principalement composé d'un mode de comportement de type cisaillement dans l'épaisseur, localisée dans la zone en contact direct entre la surface du projectile cylindrique et la structure laminée, ainsi qu'un mode de comportement de type délaminage intra-plis de laminés, situé en dehors de la zone de contact avec le projectile.

1. Solution de protection composée de matériaux céramique et composite, de renfort fibreux imprégné de résine polyéthylène basse densité et à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant des fils polyéthylènes haut module (Spectra 900), soumise à l'impact d'une munition perforante de type 12,7 mm (43g) à 610 m/s

Le recours à des structures laminées placées en face arrière d'un matériau céramique à haute résistance pour absorber l'énergie d'impact d'un projectile de type fragment type (FSP) à haute vitesse a été proposé par Hazell et al. [19] et par Appleby-Thomas et al. [20]. De plus, ils ont préconisé de porter une attention toute particulière aux structures laminées liées dans l'épaisseur dont le comportement à l'impact peut apporter des réponses significatives en terme de résistance au délaminage. Ainsi, dans le cadre de nos travaux de recherche [47][48][49][50][51][52], nous avons utilisé un tissu 3D interlock chaîne, en tant que renfort fibreux [53][54][55], pour constituer des couches successives de matériau composite par procédé thermoplastique et les substituer aux laminés unidirectionnels à base de films de polyéthylène haut module. Cette solution a fait l'objet des dépôts de 3 brevets successifs [56][57][58].

Le comportement à l'impact des couches successives de matériaux composites peut se décomposer en trois étapes (Figure 135) [59][60], comme l'ont déjà souligné différents travaux de recherche [61][62][63][64]. Dans un premier temps, le projectile perce la cible et provoque un mode de rupture par poinçonnement et cisaillement transverse des fils du premier pli A du composite à base du tissu 3D interlock chaîne, ce qui initie une déformation globale de la structure par transmission de l'onde de choc au sein de la structure multi-couches [65]. Dans un second temps, le deuxième pli B du composite se désolidarise du premier pli A par délaminage [66][67][68] et consomme ainsi une partie de l'énergie d'impact du projectile. Le mode de rupture devient une combinaison entre le cisaillement transverse et la rupture en traction dynamique des fils insérés dans les différentes couches du tissu 3D interlock chaîne. Ce qui engendre une transmission des ondes de perforation dans la direction perpendiculaire à la direction d'impact du projectile, favorisant ainsi la zone de dispersion dans le sens des fils de chaîne et trame; ce qui augmente la valeur de déformation dynamique du second pli B composite. Enfin, le troisième et dernier pli C du composite absorbe la quantité restante d'énergie du projectile par le biais de sa déformation dynamique, principalement dues à la résistance en traction dynamique et à la capacité d'allongement des fils de chaîne et trame insérés dans le tissu 3D interlock chaîne [69].

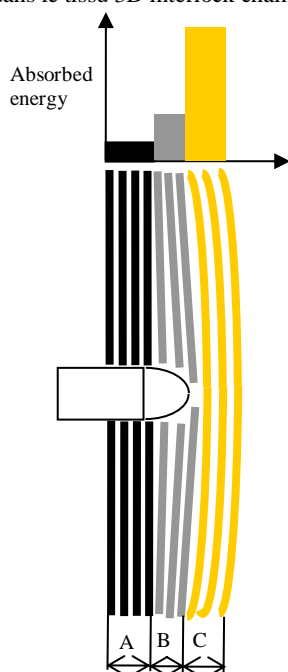


Figure 135. Comportement à l'impact des 3 couches composites renforcées d'un tissu 3D interlock chaîne à base de fils polyéthylènes haut module [53].

En considérant ce mode de comportement à l'impact, trois cibles composées, de carreaux de céramique d'alumine  $Al_2O_3$  ( $\rho = 3,9 \text{ g/cm}^3$ ) couplés à trois plis de composite à base de tissu 3D interlock chaîne de type interlock A - L liage 5-2-8 sur la base d'une armure diagonale 5-4 à base de fils polyéthylènes haut module (Spectra 900) et de fils polyéthylènes de basse densité (Figure 136), ont été réalisées [70][71]. Chacune des cibles a été soumise à un mono impact d'une munition perforante de 12,7 mm (43 g) à 610 m/s selon la norme MIL-PRF-46103-E type III [72]. Aucune des cibles impactées n'ont été perforées et une déformée maximale de 25 mm de hauteur a été mesurée post-mortem.

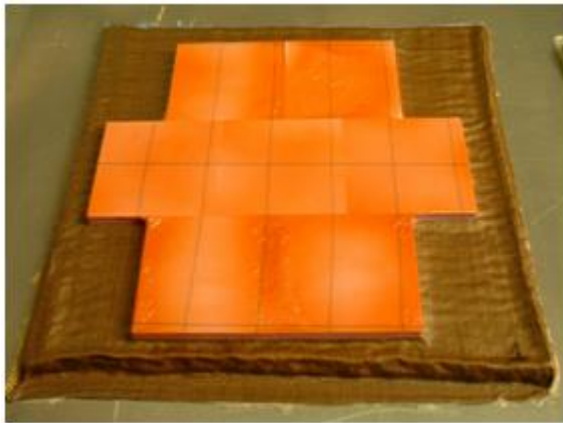


Figure 136. Cible céramique et composite à base de tissu 3D interlock chaîne (gauche) avant impact - (droite) après impact par une munition perforante de 12,7mm AP à 610 m/s selon la norme MIL-PRF-46103E type III [72].

La comparaison, par les vues en coupe des cibles composites, a permis d'observer leur mode de déformation après impact, montrant ainsi le délaminage des plis du composite à base de tissu 3D interlock chaîne (Figure 137-gauche) [54][55], et a abouti à une réduction du poids total de la cible de 10%, pour le même type d'impact, par rapport à la cible fortement dégradée à base de films de polyéthylène haut module (Figure 137-droite) [53].

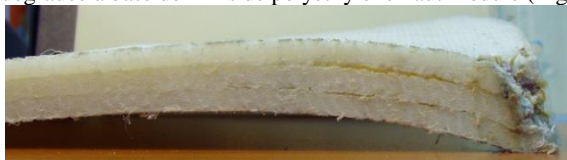


Figure 137. (gauche) Vue en coupe des 3 plis composites à base de tissu 3D interlock chaîne après impact - (droite) Vue en coupe de la structure de référence à base de films de polyéthylène haut module soumis au même type d'impact.

2. Solution de protection composée de matériaux métallique et composite, de renfort fibreux résiné époxy à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant soit des fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex) ou soit des fils polyester aromatique Vectran (2×1650 dTex), soumise à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 630 m/s.

Par la suite, dans le cadre des travaux de recherche de Lefebvre [73][74][75], nous avons étudié les modes de comportement à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 630 m/s selon la norme STANAG 4569 [76] d'une solution de protection à base de matériau métallique situé en face avant et couplé à des tissus 3D interlocks chaînes, situés en face arrière, résinés époxy et à base de fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex) ou de fils polyester aromatique Vectran (2×1650 dTex) (Figure 138).

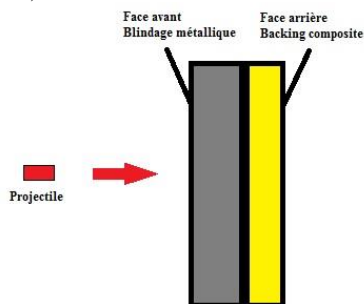


Figure 138. Représentation schématique d'une cible composée en face avant d'un blindage métallique et en face arrière d'un backing composite soumis à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 630 m/s selon la norme STANAG 4569 [76].

Initialement, nous avons observé le mode de comportement, à différentes vitesses d'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g), du matériau métallique seul (aluminium à blindage référencé). Nous avons répertorié deux cas de comportement selon les valeurs de vitesse inférieures ou supérieures à la vitesse limite de perforation du matériau métallique [73] :

- Cas de l'arrêt du projectile dans la cible. Le projectile pénètre dans le matériau métallique en face avant mais reste inséré dans la cible tout en éjectant en face arrière un bouchon d'aluminium correspondant à la matière érodée par cisaillement dans l'épaisseur durant l'impact (Figure 139 - gauche).
- Cas de la perforation de la plaque par le projectile. Le projectile perce sur toute l'épaisseur le matériau métallique et produit un cratère avec des arêtes vives sous la forme de pétales de fleur (Figure 139 - droite).

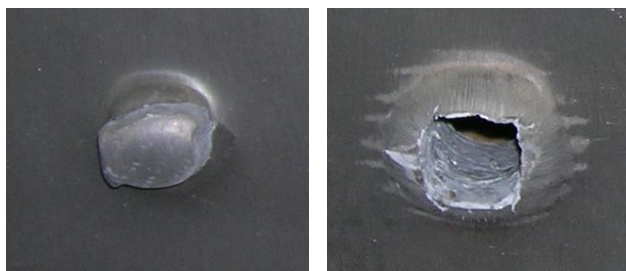


Figure 139. (gauche) Cas de l'arrêt du projectile dans l'aluminium avec formation de bouchon en face arrière - (droite) Cas de la perforation de la plaque avec la formation d'un cratère « pétales de fleur » en face arrière [73].

Connaissant la vitesse limite de perforation de la solution métallique, nous avons réalisé différentes combinaisons de matériaux composite à base de deux types fils de nature différente, telles que : des fils de para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex) ou des fils de polyester aromatique Vectran (2×1650 dTex); suivant deux procédés d'infusion différents, tels que : résine époxy à 0,5 bar avec une bâche plastique pour les tissus à base de fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex) ou à 1 bar avec deux tissus d'arrachage pour les tissus à base de fils polyester aromatique Vectran (2×1650 dTex); et pour trois architectures de tissu 3D interlock chaîne différentes (Figure 140) [77].

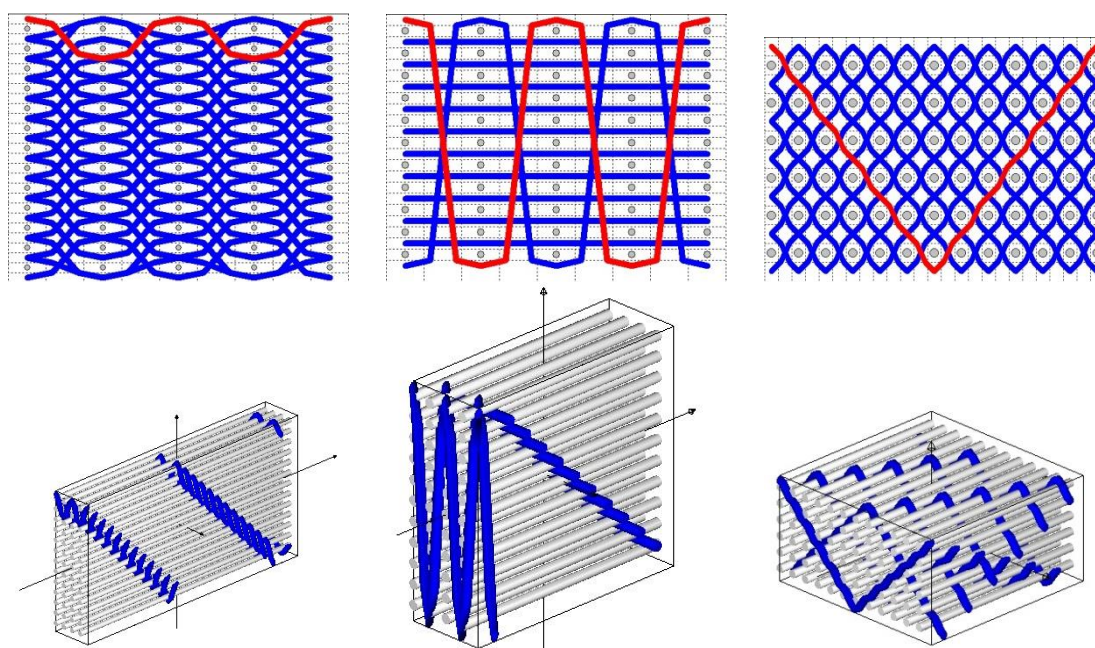


Figure 140. Représentations 2D et 3D des différents architectures de tissus 3D interlock chaîne : (gauche) Interlock O - liage L 1-2-13 avec fils de chaîne de surface - (milieu) Interlock O - Liage T 1-11-11 avec fils de chaîne de renfort - (droite) Interlock A - Liage T 11-6-6 base sergé imbriqué de 6 effet trame cordon à droite.

Les combinaisons de matériaux composites à base de tissu 3D interlock chaîne ont abouti à la production de 13 types différents, déclinés chacun en 3 cibles de dimension 40×40 cm pour la détermination de la vitesse limite de perforation de la cible finale, avec les paramètres suivants (Tableau 32).

- $R_{cT}$  (fils/cm) : nombre de fils de chaîne par centimètre
- $R_{tT}$  (fils/cm) : nombre de fils de trame par centimètre
- masse surfacique ( $\text{kg/m}^2$ ) : masse surfacique de la plaque composite
- épaisseur (mm) : épaisseur de la plaque composite

Tableau 32. Caractéristiques dimensionnelles des différentes combinaisons de plaques composites situées en face arrière de la cible finale.

Désignation Interlock	R <sub>CT</sub> (fils/cm)	R <sub>CT</sub> (fils/cm)	Masse surfacique (kg/m <sup>2</sup> )	épaisseur (mm)	Taux volumique de fibre (%)
Kevlar 29 - A-T 11-6-6	40	40	5,90	5,83	33,00
Kevlar 29 - A-T 11-6-6	20	48	4,54	4,77	40,00
Kevlar 29 - O-T 1-11-11	40	18	4,14	4,60	45,00
Kevlar 29 - O-T 1-11-11	40	55	7,20	7,08	48,00
Vectran - O-T 1-11-11	40	54	9,70	9,33	42,00
Kevlar 29 - O-L 1-2-13	40	52	5,58	5,00	45,00
Kevlar 29 - O-T 1-11-11	20	42	3,42	3,67	46,00
Vectran - O-L 1-2-13	40	38	5,98	6,33	38,00
Vectran - A-T 11-6-6	40	28	5,26	5,53	35,00
Kevlar 29 - O-L 1-2-13	20	130	9,36	9,33	58,00
Vectran - O-L 1-2-13	20	130	7,52	7,40	50,00
Vectran - A-T 11-6-6	20	40	3,77	4,57	45,00
Vectran - O-T 1-11-11	20	53	5,12	5,27	42,00

Nous avons observé que la valeur de la masse surfacique des plaques composites semble évoluer de la même façon que la valeur de l'épaisseur des plaques composites (Figure 141), ce qui montre que selon les architectures tissées combinées aux types de fils utilisés, à la densité des fils de chaîne fixée lors du montage sur machine à tisser et à la densité des fils de trame obtenue lors du procédé de tissage à insertion manuelle et au tassage de peigne à force manuelle constante, les taux volumiques de fibres obtenus après infusion de la résine époxy sont dépendants de l'ensemble de ces paramètres.

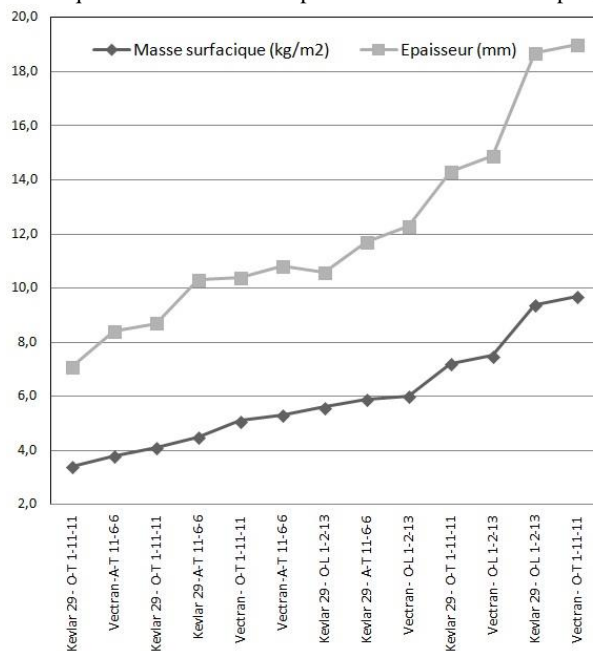


Figure 141. Évolution de la masse surfacique des plaques composites en fonction de l'épaisseur.

Les 13 combinaisons de matériaux composites à base de tissu 3D interlock chaîne ont permis de définir la vitesse limite de perforation (VLP) de la cible finale en prenant la valeur moyenne des vitesses du projectile dans les cas d'une protection et d'une perforation (Tableau 33). Cependant, pour comparer les solutions de protection en terme de performance balistique nous avons opté pour un critère énergétique de type  $\frac{VLP^2}{\text{masse surfacique}}$  permettant de compenser les différences de masse surfacique obtenue pour les tissus 3D interlock chaîne produits [73]. Enfin, pour les vitesses supérieures à la vitesse limite de perforation nous avons pu observer après impact trois formes principales d'endommagement : bi-directionnelle (Figure 142), localisée (Figure 143) et uni-directionnelle (Figure 144) [78].



Tableau 33. Détermination des performances balistiques de la solution de protection (face avant matériau métallique et face arrière backing composite) à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) et observation des principales formes d'endommagement.

Désignation Interlock	VLP (m/s)	$\frac{VLP^2}{\text{masse surfacique}} \times 10^{-2}$	Forme d'endommagement
Vectran - O-T 1-11-11	652	438	bi-directionnelle
Kevlar 29 - O-L 1-2-13	660	465	uni-directionnelle
Kevlar 29 - A-T 11-6-6	552	516	bi-directionnelle
Kevlar 29 - O-T 1-11-11	630	551	bi-directionnelle
Vectran - O-L 1-2-13	650	562	uni-directionnelle
Kevlar 29 - O-L 1-2-13	600	645	Localisée
Vectran - A-T 11-6-6	590	662	Localisée
Vectran - O-L 1-2-13	635	674	Localisée
Vectran - O-T 1-11-11	609	724	uni-directionnelle
Kevlar 29 - A-T 11-6-6	584	751	bi-directionnelle
Kevlar 29 - O-T 1-11-11	585	827	bi-directionnelle
Kevlar 29 - O-T 1-11-11	551	888	Localisée
Vectran - A-T 11-6-6	620	1020	uni-directionnelle

Les solutions de protection dont les valeurs de la vitesse limite de perforation de la cible finale sont supérieures à 630 m/s sont associés aux tissus 3D interlock chaîne dont le nombre de couches est le plus élevé, respectivement 11 et 13 couches. L'architecture de type : Interlock O - liage L 1-2-13 avec fils de chaîne de surface, contribue majoritairement aux valeurs les plus élevées de la vitesse limite de perforation de la cible finale.



Figure 142. Représentation de la forme d'endommagement bi-directionnelle en face arrière du tissu Interlock A - Liage T 11-6-6 base sergé imbriqué de 6 effet trame cordon à droite (fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex)) avec 40 fils de chaîne/cm et 40 fils de trame/cm impacté par un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse initiale de 640 m/s.



Figure 143. Représentation de la forme d'endommagement localisée en face arrière du tissu Interlock O - liage L 1-2-13 (fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex)) avec fils de chaîne de surface à 40 fils de chaîne/cm et 52 fils de trame/cm impacté par un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse initiale de 620 m/s.



Figure 144. Représentation de la forme d'endommagement uni-directionnelle en face arrière du tissu (gauche) Interlock O - liage L 1-2-13 (fils para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex)) avec fils de chaîne de surface à 20 fils de chaîne/cm et 130 fils de trame/cm impacté par un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse initiale de 700 m/s -(droite) Interlock O - liage L 1-2-13 (fils polyester aromatique Vectran (2x1650 dTex)) avec fils de chaîne de surface à 20 fils de chaîne/cm et 130 fils de trame/cm.

Cependant, la comparaison des performances à l'impact des solutions de protection, avec le critère énergétique  $\frac{VLP^2}{\text{masse surfacique}} \times 10^{-2}$ , révèle que le tissu 3D interlock chaîne à 6 couches, de type : Interlock A - Liage T 11-6-6 base sergé façonné de 6 effet trame cordon à droite à base de fils polyester aromatique Vectran (2×1650 dTex), semble être la solution la plus performante, à iso-masse surfacique [79].

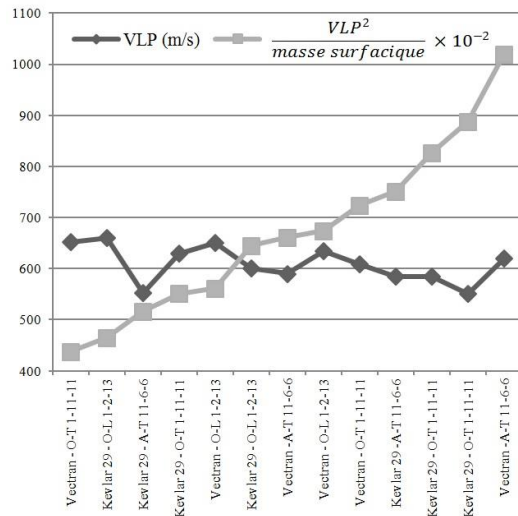


Figure 145. Comparaison des solutions de protection (face avant matériau métallique et face arrière matériau composite) en fonction de la vitesse limite de protection (VLP) et un critère énergétique  $\frac{VLP^2}{\text{masse surfacique}}$ .

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous ne disposons pas de moyens de production de tissage adaptés à la sélection de plus 24 fils de chaîne, ce qui ne nous a pas permis de réaliser l'architecture de tissu Interlock A - Liage T à 11 ou 13 couches et de la comparer aux architectures des tissus 3D interlocks chaînes équivalentes en nombre de couches.

Néanmoins, nous avons identifié des solutions de protection à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) pour des vitesses limites supérieures à 630 m/s dont le renfort fibreux de la partie composite semble s'orienter vers une architecture de type orthogonal en liage couche à couche avec un nombre élevé de couches de fils de trame au sein de la structure. Nous pouvons envisager dans des travaux futurs de recherche, de mesurer l'influence du nombre de couches sur les capacités d'absorption de l'énergie d'impact par le tissu 3D interlock chaîne. Nous avons pu également observer que le taux élevé de résine en volume au sein de la structure composite limite la déformation du renfort fibreux et donc diminue sa capacité d'absorption de l'énergie d'impact [80]. Un procédé d'infusion permettant de diminuer le volume de résine au sein du tissu 3D interlock chaîne, tout en imprégnant au cœur de la structure, serait également à envisager dans le cadre de travaux futurs. Le type de résine semble également influencer le mode de comportement à l'impact de structures composites, comme l'ont précisé Lee et al. [81] dans leurs travaux de recherche démontrant une résistance balistique, ainsi qu'à la fatigue, plus importantes pour des matériaux composites à base de fils polyéthylènes haut module de type Spectra et infusés de résine vinyle-ester que pour les mêmes types de renforts fibreux à base de résine polyuréthane.

### 3. Solution de protection composée de matériaux métallique et composite, de renfort fibreux imprégné de résine thermoplastique à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant des fils para-aramide et des fils polyéthylène basse densité, soumise à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54g) à 1600 m/s

Dans les travaux de recherche de Nayak et al. [82], des analyses d'images, issues d'un procédé de mesure par ultrason, ont permis de révéler des zones de déformation plus importantes pour des matériaux composites à base de résine polypropylène qu'à base de résine époxy, tout en possédant le même type de renfort fibreux, tel qu'un tissu à base de fils de para-aramide Twaron, suite à l'impact balistique à différente gamme de vitesses d'une munition perforante de type 7,62 mm AP. Cela tend à révéler une capacité d'absorption de l'énergie d'impact balistique plus grande pour les matériaux composites à base de résine thermoplastique que thermodurcissable.

Ainsi, dans le cadre des travaux de recherche de Provost [83] [84], nous avons étudié les modes de comportement à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 1600 m/s selon la norme STANAG 4569 [76] d'une solution de protection à base de matériau métallique situé en face avant et couplé à différents matériaux composites à base de tissus 3D interlocks chaînes, à base de fils para-aramide Twaron (3360 dTex), situés en face arrière et imprégnés de résine thermoplastique ou de résine thermodurcissable.

Dans la continuité des travaux de Lefebvre [73] [85], la face avant de la solution de protection a été décomposée en deux matériaux métalliques d'épaisseurs différentes permettant de conserver une vitesse résiduelle du projectile en sortie du blindage métallique estimée à 431 m/s par les simulations numériques [83] (Figure 146 - gauche). Lors des différents essais d'impact par FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à différente vitesse, nous avons observé les mêmes comportements à l'impact des matériaux métalliques de sur-blindage et blindage conduisant à une non perforation du backing composite (Figure 146 - droite) ou une perforation.



Figure 146. (gauche) Représentation schématique d'une cible composée en face avant d'un sur blindage et blindage métallique et en face arrière d'un backing composite soumis à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 1600 m/s selon la norme STANAG 4569 [76] - (droite) Observation des plaques de sur-blindage et blindage métallique perforées et du backing composite non perforé.

En considérant les paramètres de l'architecture de nos brevets [56][57][58], trois types de backing composite ont été réalisés, chacun décliné en 3 cibles soumises à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) pour déterminer la vitesse limite de perforation, et ont permis de révéler l'influence de la structure 3D interlock chaîne [86] mais aussi de l'imprégnation par résine thermoplastique sur la capacité d'absorption de l'énergie d'impact [87].

Le premier backing composite (Tissu 2D prepreg 10 mm) est constitué d'un empilement de 27 plis de tissus 2D para-aramides pré-imprégnés de résine phénolique et assemblés sous presse chauffante jusqu'à une température de 160°C, sous une pression de 120 bars pendant 120 minutes (Tableau 34).

Tableau 34. Caractéristiques du backing composite (Tissu 2D prepreg 10 mm) à base de 27 plis de tissus 2D para-aramide pré-imprégnés.

Backing Composite : Tissu 2D prepreg 10 mm		Composition fibre/matrice			
Épaisseur (mm)	10	Type Renfort fibreux	Tissu armure Toile T750 Teijin		
Masse surfacique (kg/m <sup>2</sup> )	12,3	Densité en fils de chaîne (fils/cm)	6,7	Type fils de chaîne	Para-aramide (3360 dTex) Twaron
Nombre plis tissu	27	Densité en fils de trame (fils/cm)	6,7	Type fils de trame	Para-aramide (3360 dTex) Twaron
Orientation des plis	0° - 90° sens chaîne	Résine (pré-imprégnée)	Phénol-PVB		
		Taux de résine en masse (%)	18		

Le deuxième backing composite (Tissu 3D ThPlastique 13 mm) est constitué d'un empilement de 3 plis de tissus 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 (Figure 147) et assemblés sous presse chauffante pendant 40 minutes à une température de 120° C à une pression de 75 bars (Tableau 35).

Tableau 35. Caractéristiques du backing composite (Tissu 3D ThPlastique 13 mm) à base de 3 plis de tissus 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3.

Backing Composite Tissu 3D ThPlastique 13 mm		Composition fibre/matrice			
Épaisseur (mm)	13	Type Renfort fibreux	Tissu Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 (Figure 147)		
Masse surfacique (kg/m <sup>2</sup> )	16,8	Densité en fils de chaîne (fils/cm)	20	Type fils de chaîne	Para-aramide (3360 dTex) Twaron
Nombre plis tissu 3D interlock chaîne	3	Densité en fils de trame para-aramide (fils/cm)	105	Types fils de trame	Para-aramide (3360 dTex) Twaron
Orientation des 3 plis de tissu 3D interlock chaîne	0° - 90° - 0° sens chaîne	Densité en fils de trame de polyéthylène basse densité PEBD (fils/cm)	78		Comélé para-aramide (3360 dTex)/PEBD (1850 dTex) Twaron
		Taux de résine en masse (%)	21		

La formule de tramage (ordre d'insertion des types de fils de trame) du tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 est de 3 fils comelés para-aramide Twaron (3360 dTex)/ polyéthylène basse densité (1850 dTex) et 1 fil para-aramide Twaron (3360 dTex) (Figure 147 - droite).



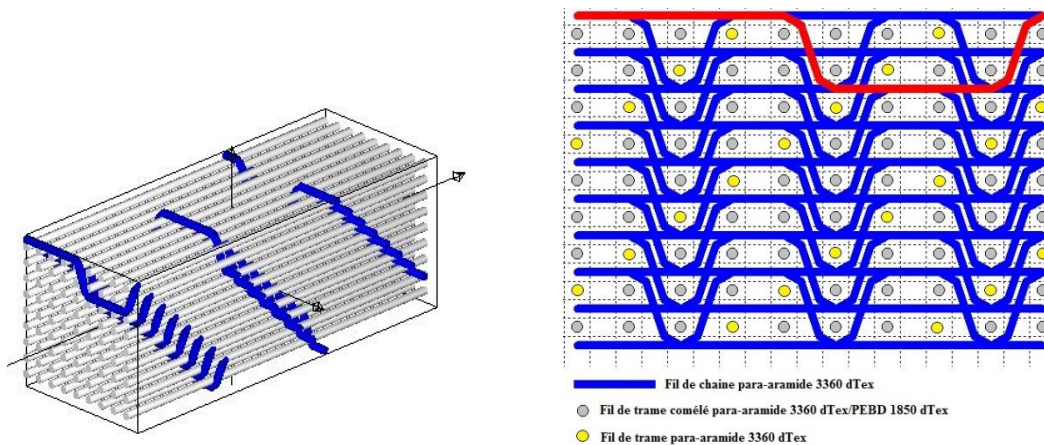


Figure 147. Représentation du tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 (gauche) en vue 3D - (droite) vue en coupe des fils de trame avec la formule de tramage (3 fils comelés para-aramide Twaron (3360 dTex)/ polyéthylène basse densité (1850 dTex) - 1 fil para-aramide Twaron (3360 dTex)).

Le troisième backing composite (Tissu 3D ThDurcissable 20 mm) est constitué d'un empilement de 3 plis de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 (Figure 147) et infusés sous vide de résine vinyl-ester (Tableau 36).

Tableau 36. Caractéristiques du backing composite (Tissu 3D ThDurcissable 20 mm) à base de 27 plis de tissus 2D para-aramide pré-imprégnés.

Backing Composite Tissu 3D ThDurcissable 20 mm		Composition fibre/matrice			
Épaisseur (mm)	20	Type Renfort fibreuse	Tissu Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 (Figure 148)		
Masse surfacique (kg/m <sup>2</sup> )	25	Densité en fils de chaîne (fils/cm)	20	Type fils de chaîne	Para-aramide Twaron (3360 dTex)
Nombre plis tissu 3D interlock chaîne	3	Densité en fils de trame (fils/cm)	135	Type fils de trame	Para-aramide Twaron (3360 dTex)
Orientation des 3 plis de tissu 3D interlock chaîne	0° - 90° - 0° sens chaîne	Résine (infusée)	Vinyl-ester		
		Taux de résine en masse (%)	38		

Le tissu 3D interlock chaîne de type Tissu Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 est à base uniquement de fils de para-aramide Twaron (3360 dTex) (Figure 148).

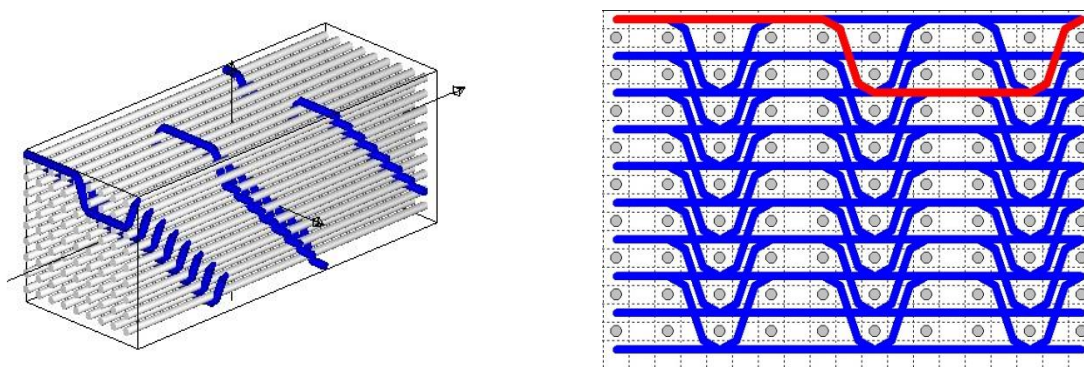


Figure 148. Représentation du tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 à base de fils para-aramide Twaron (3360 dTex) (gauche) en vue 3D - (droite) vue en coupe des fils de trame.

Nous avons pu observer les déformations après impact des trois types de backing composite, respectivement Tissu 2D prepreg 10 mm (Figure 149), Tissu 3D ThPlastique 13 mm (Figure 150) et Tissu 3D ThDurcissable 20 mm (Figure 151), soumis aux différentes vitesses d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) conduisant à des perforations ou des non perforations des cibles [88].



Figure 149. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (bas) du backing composite type Tissu 2D prepreg 10 mm après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) pour une vitesse d'impact de : (gauche) 1610 m/s - masse surfacique = 153 kg/m<sup>2</sup> - non perforation, (milieu) 1740 m/s - masse surfacique = 151,6 kg/m<sup>2</sup> - perforation, (droite) 1808 m/s - masse surfacique = 153,5 kg/m<sup>2</sup> - perforation.



Figure 150. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (bas) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 13 mm après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) pour une vitesse d'impact de : (gauche) 1621 m/s - masse surfacique = 155,8 kg/m<sup>2</sup> - non perforation, (milieu) 1661 m/s - masse surfacique = 154,1 kg/m<sup>2</sup> - perforation, (droite) 1607 m/s - masse surfacique = 156,7 kg/m<sup>2</sup> - non perforation.

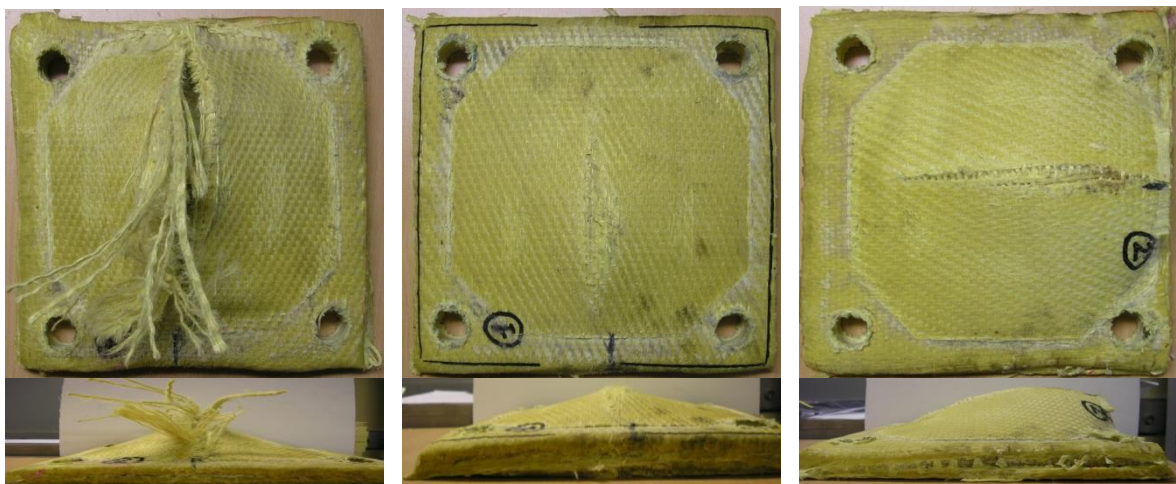


Figure 151. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (bas) du backing composite type Tissu 3D ThDurcissable 20 mm après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) pour une vitesse d'impact de : (gauche) 1666 m/s - masse surfacique = 166 kg/m<sup>2</sup> - perforation, (milieu) 1570 m/s - masse surfacique = 166 kg/m<sup>2</sup> - non perforation, (droite) 1532 m/s - masse surfacique = 163,9 kg/m<sup>2</sup> - non perforation.



Les valeurs de vitesse limite de perforation pour les 3 types de backing composite sont alors comprises entre une valeur minimale de vitesse correspondant à un état de non perforation et une valeur maximale de vitesse correspondant à un état de perforation, respectivement :  $VLP(Tissu\ 2D\ prepreg\ 10\ mm) \in [1610; 1740]$ ,  $VLP(Tissu\ 3D\ ThPlastique\ 13\ mm) \in [1621; 1661]$  et  $VLP(Tissu\ 3D\ ThDurcissable\ 20\ mm) \in [1570; 1666]$  [89].

Par le biais de cette technique expérimentale de tir sur cibles, il est difficile de déterminer précisément la valeur exacte de limite de perforation des solutions de backing composite. Cependant, nous avons pu observer que le backing composite de type Tissu 3D ThDurcissable 20 mm possède des performances à l'impact du FSP plus limitées que les deux autres types de backing composite, due à l'utilisation de résine vinyl-ester qui tend à rigidifier la structure tissée 3D interlock chaîne et provoque des déformations en rupture uni-directionnelle dans le cas d'une perforation (Figure 151 - gauche - haut) mais aussi dans les cas de non perforation (Figure 151 - milieu - haut et Figure 151 - droite - haut). Nous avons pu également constater de nombreux délaminages inter-plis pour le backing composite de type Tissu 2D prepreg 10 mm aussi bien dans le cas des perforations (Figure 149 - milieu - bas et Figure 149 - droite - bas) mais aussi dans le cas de la non perforation (Figure 149 - gauche - bas); ce qui induit une structure fortement dégradée après le premier impact et ne permet pas de garantir une non perforation lors d'un deuxième impact situé à proximité. Nous avons pu montrer la capacité du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 13 mm à se déformer sous impact d'un FSP et maintenir ainsi une structure composite suffisamment intègre pour les cas de non perforation (Figure 150 - gauche - haut et Figure 150 - droite - haut) mais aussi pour le cas de perforation (Figure 150 - milieu - haut) avec une rupture des fils plutôt localisés au point d'impact. Une décohérence des 3 plis de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 est observée pour l'ensemble des backings composites de type Tissu 3D ThPlastique 13 mm (Figure 150), tout en conservant une cohésion des couches au sein de chaque pli de tissu 3D interlock chaîne (Figure 150 - bas). Ce mode de déformation dynamique semble plus adapté à l'absorption d'énergie d'impact et nous avons proposé une amélioration du backing composite en le décomposant en deux parties d'épaisseurs différentes pour créer un gradient de déformation lors de l'impact par rapport à une cible d'épaisseur unique [90].

Ainsi, dans le cadre des travaux de recherche de Provost [83][91][92], deux types de backing composite ont été réalisés avec une même épaisseur finale de 13 mm et une même masse surfacique de  $150\ kg/m^2$ . Le premier type de backing composite (Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 2D prepreg 5 mm) est composé d'une première partie de 8 mm d'épaisseur correspondant à trois plis thermo-compressés de tissus 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 (Figure 147) et d'une deuxième partie de 5 mm d'épaisseur correspondant à 13 plis de tissus 2D para-aramides pré-imprégnés de résine phénolique et assemblés sous presse chauffante (Figure 152 - gauche). Le deuxième type de backing composite (Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 3D ThPlastique 5 mm) est composé d'une première partie de 8 mm d'épaisseur correspondant à trois plis thermo-compressés de tissus 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 (Figure 147) et d'une deuxième partie de 5 mm d'épaisseur correspondant à deux plis du même tissu 3D interlock chaîne (Figure 152 - droite).

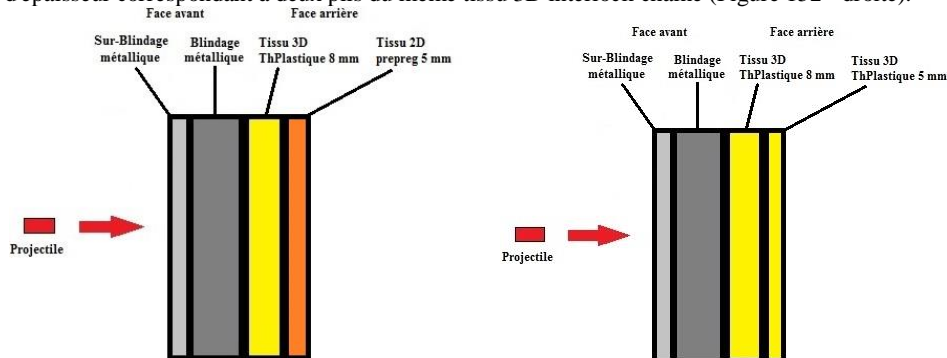


Figure 152. Représentation schématisée des deux types de backing composite : (gauche) Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 2D prepreg 5 mm - (droite) Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 3D ThPlastique 5 mm, soumis à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 1600 m/s selon la norme STANAG 4569 [76].

Nous avons observé pour le backing de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 2D prepreg 5 mm un cas de perforation pour une vitesse d'impact initiale de 1700 m/s (Figure 153) et deux cas de non-perforations pour des vitesses respectives de 1648 m/s et 1666 m/s (Figure 154). Dans le cas de la perforation (Figure 153 - haut - droite) mais aussi de la non perforation (Figure 154 - haut - droite), l'observation de la forme de rupture du pli de Tissu 2D prepreg 5 mm tend à montrer un comportement plus rigide lors de l'impact, ce qui provoque une rupture en tension des fils en contact avec le projectile. Dans le cas de la non perforation (Figure 154 - haut - gauche), le pli de Tissu 3D ThPlastique 8 mm ne présente aucune rupture des fils en surface, ce qui révèle une plus grande capacité à se déformer lors de l'impact. Dans le cas de la perforation (Figure 153 - haut - gauche), la rupture du pli de Tissu 3D ThPlastique 8 mm reste localisée aux fils en contact direct avec la surface du projectile. Cette différence de comportement à la déformation entre les deux types de renforts fibreux conduit à une forte décohérence entre les deux parties du backing composite et se révèle par espace vide important entre les plis, et sur toute la surface, aussi bien dans le cas de la perforation (Figure 153 - bas) que de la non perforation (Figure 154 - bas).

Nous avons observé pour le backing de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 3D ThPlastique 5 mm uniquement trois cas de non-perforations aux vitesses d'impact respectivement de 1682 m/s (Figure 155), 1716 m/s et 1742 m/s (Figure 156). Aucune rupture des fils en surface n'apparaît pour les deux cas de non perforations et pour les deux plis Tissu 3D ThPlastique 8 mm (Figure 155 et Figure 156 - haut - gauche) et Tissu 3D ThPlastique 5 mm (Figure 155 et Figure 156 - haut - droite). L'observation des vues en coupe (Figure 155 et Figure 156 - bas) des deux parties Tissu 3D ThPlastique 8 mm et Tissu 3D

ThPlastique 5 mm permet de révéler une plus grande capacité à se déformer et à absorber l'énergie d'impact des projectiles de type FSP [93].

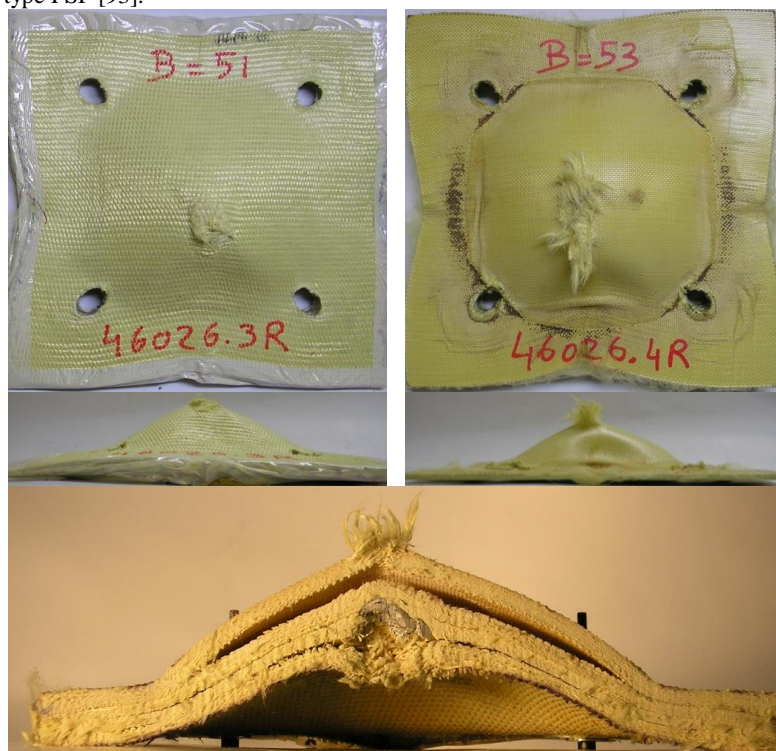


Figure 153. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (milieu) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 8 mm (gauche) et du backing composite de type Tissu 2D prepreg 5 mm (droite) après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse d'impact de 1700 m/s - masse surfacique =  $155,2 \text{ kg/m}^2$  aboutissant à une perforation - (bas) vue en coupe du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 2D prepreg 5 mm après impact.



Figure 154. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (milieu) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 8 mm (gauche) et du backing composite de type Tissu 2D prepreg 5 mm (droite) après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse d'impact de 1666 m/s - masse surfacique =  $155,2 \text{ kg/m}^2$  aboutissant à une non perforation - (bas) vue en coupe du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 2D prepreg 5 mm après impact.



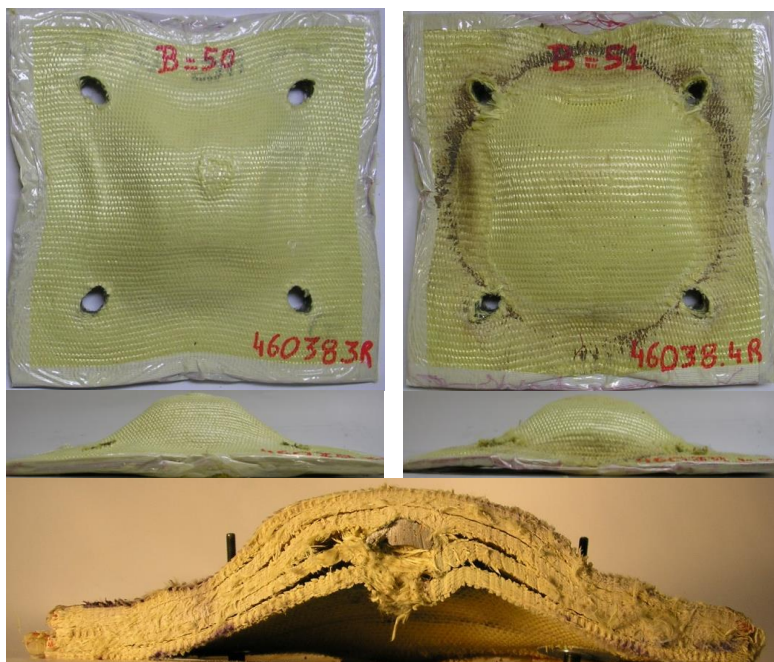


Figure 155. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (milieu) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 8 mm (gauche) et du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 5 mm (droite) après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse d'impact de 1682 m/s - masse surfacique = 154,5 kg/m<sup>2</sup> aboutissant à une non perforation - (bas) vue en coupe du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 3D ThPlastique 5 mm après impact.

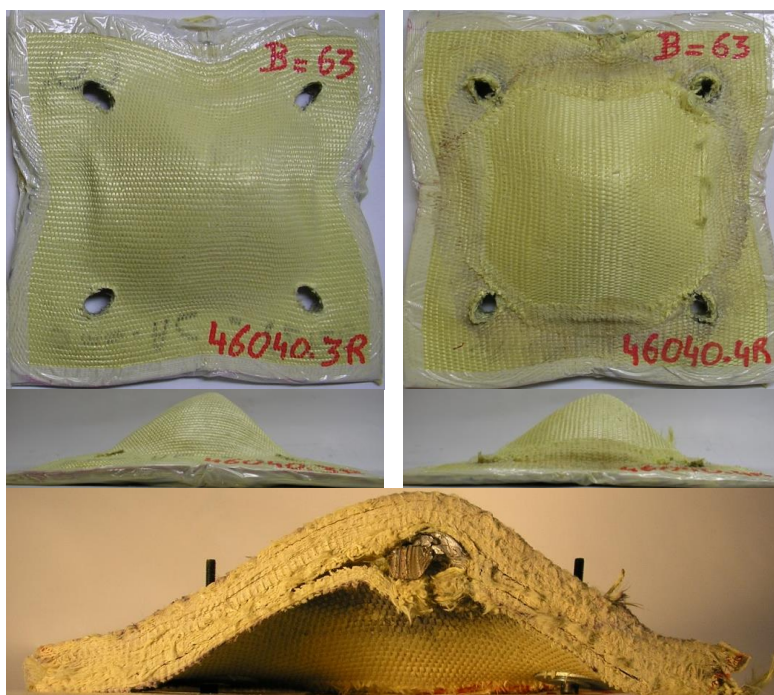


Figure 156. Représentations en vue de face arrière (haut) et en vue de côté (milieu) du backing composite type Tissu 3D ThPlastique 8 mm (gauche) et du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 5 mm (droite) après impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à une vitesse d'impact de 1742 m/s - masse surfacique = 155,7 kg/m<sup>2</sup> aboutissant à une non perforation - (bas) vue en coupe du backing composite de type Tissu 3D ThPlastique 8 mm + Tissu 3D ThPlastique 5 mm après impact.

## C. Conclusion sur les solutions de protection dure à l'impact

Dans le cadre des travaux de recherche menés sur les solutions de protection dure à l'impact utilisant un matériau composite seul ou un couplage de matériaux, nous avons pu révéler l'intérêt des structures composites textiles, et notamment celles intégrant des tissus 3D interlock chaîne. En effet, la capacité de déformation dynamique plus importante de cette structure apparaît plus adaptée pour absorber l'énergie d'impact, comme nous avons pu le montrer avec les solutions couplées avec un matériau céramique face à une munition de type 12,7 mm (masse 43 g) à 610 m/s [58] ou celles couplées avec des matériaux métalliques face à une menace de type FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 630 m/s [73] et 1600 m/s [83]. A chacune de ces différentes menaces dépend un type de matériau composite spécifique, dont un ensemble de paramètres endogènes contribue à définir le mode de comportement à l'impact adapté, tels que : la nature et le type de fils utilisés, l'architecture et le nombre de couches du tissu 3D interlock chaîne, les densités des fils de chaîne et trame, le type de résine et son procédé associé.

## IV. Synthèse

Dans le cadre des travaux de recherche menés sur les solutions de protection dure à l'impact, nous avons fourni une description du phénomène d'impact sur des structures composite par le biais de nos propres observations et des résultats issus de la littérature. Des précisions sur le mode de comportement à l'impact des tissus 3D interlocks chaînes en tant que renfort fibreux d'un matériau composite, issues des travaux de recherche de la littérature, nous ont permis de distinguer les paramètres influents de ces structures, tels que : le type et la nature du fil, le type de résine et son procédé de mise en œuvre, le type d'architecture, le nombre de couches et les densités des fils de chaîne et trame des tissus 3D interlocks chaînes. Fort de ces précisions, nous avons proposé une solution composite seule, fondée sur une approche analytique, pour répondre à la menace d'une munition de type 7,62 × 51 mm AP WC (type AP8) (8,21 g) à 930 m/s. Nous avons identifié une solution de 300 plis d'UD de carbone (pré-imprégné T700/résine époxy M10R) de 120 kg/m<sup>2</sup> pour répondre à cette menace. Par la suite, nous avons proposé différentes solutions de protection dure en deux parties, l'une métallique ou céramique et l'autre composite, pour répondre aux différentes menaces et vitesses d'impact. La première solution de protection dure de 41,8 kg/m<sup>2</sup>, comprenant une partie en matériau céramique de type Alumine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et l'autre partie en matériau composite, de renfort fibreux imprégné de résine polyéthylène basse densité et à base de tissu 3D interlock chaîne intégrant des fils polyéthylènes haut module (Spectra 900), a permis de répondre à l'impact d'une munition perforante de type 12,7 mm (masse 43 g) à 610 m/s. La deuxième solution de protection dure, comprenant une partie en matériau métallique et l'autre partie en matériau composite, de renfort fibreux imprégné de résine polyéthylène basse densité et à base de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock O - liage L 1-2-13 avec fils de chaîne de surface intégrant des fils de para-aramide Kevlar 29 (3300 dTex), a permis de répondre à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) jusqu'à 660 m/s. Enfin, la troisième solution de protection dure de 155,7 kg/m<sup>2</sup>, comprenant une partie en matériau métallique et l'autre partie en matériau composite, de deux renforts fibreux (5 et 8 mm d'épaisseur) imprégnés de résine polyéthylène basse densité et à base de tissu 3D interlock chaîne de type Interlock A - Liage L 4-2-9 sur base diagonale 5-4 décochement de 3 intégrant des fils de para-aramide Twaron (3360 dTex), a permis de répondre à l'impact d'un FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) jusqu'à 1742 m/s.

Le développement de ce thème relatif au comportement à l'impact des structures textiles composites a été valorisé scientifiquement par :

- 5 publications [31][53][60][74][86],
- 3 brevets [56][57][58],
- 25 communications [33][36][47][48][49][50][51][52][54][55][69][75][77][78][79][80][84][85][87][88][89][90][91][92][93],
- 2 thèses soutenues [73][83],
- 2 masters recherches soutenus [34][35].

## V. Bibliographie

- [1] A.D. Resnyansky, "The Impact Response of Composite Materials Involved in Helicopter Vulnerability Assessment: Literature Review - Part 2, Weapons Systems Division," Defence Science and Technology Organisation (DSTO), PO Box 1500, Edinburgh South Australia 5111 Australia, DSTO-TR-1842 Part 2 AR-013-617, April 2006.
- [2] A. Shahkarami, E. Cepas, R. Vaziri, and A. Poursartip, "Material responses to ballistic impact," in *Lightweight ballistic composites, Military and law-enforcement applications*. Abington, UK: Woodhead Publishing Limited, pp. 72–100.
- [3] N.K. Naik, P. Shirao, and B.C.K. Reddy, "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, pp. 1521–1552, 2006.
- [4] N.K. Naik and A.V. Doshi, "Ballistic impact behaviour of thick composites: Parametric studies," *Composite Structures*, vol. 82, pp. 447–464, 2008.
- [5] N.K. Naik and A.V. Doshi, "Ballistic impact behaviour of thick composites: analytical formulation," *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, vol. 43, no. 7, pp. 1525–1536, 2005.
- [6] B.Z. Gama Haque and J.W. Gillespie Jr, "A combined theoretical-semi empirical penetration model of ballistic penetration of thick section composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 25, pp. 631–653, 2012.
- [7] M. Grujicic, B. Pandurangan, K.L. Koudel, and B.A. Cheeseman, "A computational analysis of the ballistic performance of light-weight

- hybrid composite armors," *Applied Surface Science*, vol. 253, pp. 730–745, 2006.
- [8] G. Faur-Csukat, "A Study on the Ballistic Performance of Composites," *Special Issue: Advanced Polymers, Composites and Technologies*, vol. 239, no. 1, pp. 217–226, June 2006.
  - [9] B. Vieille, V.M. Casado, and C. Bouvet, "About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study," *Composite Structures*, vol. 101, pp. 9–21, 2013.
  - [10] D. Zhang, Y. Sun, L. Chen, S. Zhang, and N. Pan, "Influence of fabric structure and thickness on the ballistic impact behavior of Ultrahigh molecular weight polyethylene composite laminate," *Materials and Design*, vol. 54, pp. 315–322, 2014.
  - [11] L. Sanchez Paradel and V. Sanchez-Galvez, "Analytical simulation of high-speed impact onto composite materials targets," *Journal of Strain Analysis*, vol. 48, no. 5, pp. 282–290, July 2013.
  - [12] S.S. Morye, P.J. Hine, R.A. Duckett, D.J. Carr, and I.M. Ward, "Modelling of the energy absorption by polymer composites," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 2631–2642, 2000.
  - [13] A.P. Mouritz, "Ballistic impact and explosive blast resistance of stitched composites," *Composite Part B*, vol. 32, pp. 431–439, 2000.
  - [14] E. Wu and J. Wang, "Behavior of Stitched Laminates under In-Plane Tensile and Transverse Impact Loading," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, pp. 2254–2279, 1995.
  - [15] S.K. Sharma and B.V. Sankar, "Effect of Stitching on Impact and Interlaminar Properties of Graphite/Epoxy Laminates," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 10, pp. 241–253, 1997.
  - [16] T.J. Kang and S.H. Lee, "Effect of Stitching on the Mechanical and Impact Properties of Woven Laminate Composite," *Journal of Composite Materials*, vol. 28, pp. 1574–1587, 1994.
  - [17] M.V. Hosur et al., "Studies on Impact Damage Resistance of Affordable Stitched Woven Carbon/Epoxy Composite Laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 22, pp. 927–955, 2003.
  - [18] M.V. Hosur, M.R. Karim, and S. Jeelani, "Studies on Stitched Woven S2 Glass/Epoxy Laminates under Low Velocity and Ballistic Impact Loading," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 23, pp. 1313–1323, 2004.
  - [19] P.J. Hazell and G.J. Appleby-Thomas, "The impact of structural composite materials. Part 1: ballistic impact," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 47, pp. 396–405, 2012.
  - [20] G.J. Appleby-Thomas and P.J. Hazell, "The impact of structural composite materials. Part 2: hypervelocity impact and shock," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 47, pp. 406–418, 2012.
  - [21] Y. Hou, B. Sun, and B. Gu, "An analytical model for the ballistic impact of three dimensional angle interlock woven fabric penetrated by a rigid cylindro-spherical projectile," *Textile Research Journal*, vol. 81, no. 12, pp. 1287–1303, 2011.
  - [22] X. Jia, B. Sun, and B. Gu, "A Numerical Simulation on Ballistic Penetration Damage of 3D Orthogonal Woven Fabric at Microstructure Level," *International Journal of damage mechanics*, vol. 21, pp. 237–266, March 2012.
  - [23] R. Gerlach, C.R. Siviour, J. Wiegand, and N. Petrinic, "In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading," *Composites Science and Technology*, vol. 72, pp. 397–411, 2012.
  - [24] E. Archer, J. Broderick, S. Buchanan, and A.T. McIlhagger, "Internal strain measurement and impact response of three-dimensional angle interlock woven carbon fibre composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 32, pp. 912–924, 2013.
  - [25] X. Wang et al., "Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 444–450, 2008.
  - [26] B. Zahid and X. Chen, "Impact evaluation of Kevlar-based angle-interlock woven textile composite structures," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 32, no. 12, pp. 925–932, 2013.
  - [27] Y. Luo, L. Lv, B. Sun, Y. Qiu, and B. Gu, "Transverse impact behavior and energy absorption of three-dimensional orthogonal hybrid woven composites," *Composite Structures*, vol. 81, pp. 202–209, 2007.
  - [28] K. Luan, B. Sun, and B. Gu, "Ballistic impact damages of 3-D angle-interlock woven composites based on high strain rate constitutive equation of fiber tows," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 57, pp. 145–158, 2013.
  - [29] J.N. Baucom, M.A. Zikry, and Y. Qiu, "Dynamic and Quasi-static Failure Evolution of 3D Woven Cellular Composite Systems," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 23, no. 5, pp. 471–481, 2004.
  - [30] B.Z. Haque Gama, M.M. Kearney, and J.W. Gillespie, "Advances in Protective Personnel and Vehicle Armors," *Recent Patents on Materials Science*, vol. 5, pp. 103–134, 2012.
  - [31] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "Intelligent textiles for armoured vehicles," in *Smart Textiles for protection*, R. Chapman, Ed.: Woodhead Publishing, 2010.
  - [32] V. Madhu and T. Balakrishna Bhat, "Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles," *Defence Science Journal*, vol. 61, no. 4, pp. 394–402, July 2011.
  - [33] F. Boussu and X. Legrand, "Interesting properties of 3D Warp interlock structures to delamination and impact resistance," in *SEICO 08, SAMPE EUROPE International Conference and Forum*, Paris, France, March 31st. – April 2nd, 2008, pp. 297–302.
  - [34] J. Pariente, "New 3D textile solution for anti-ballistic structures," Gemtex Laboratory, Roubaix, France, Master MPT ENSAIT 2011.
  - [35] P. Garin, "Élaboration d'un blindage composite contre les menaces de type « Armour Piercing », " Renault Truck Defence, Satory, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2012.
  - [36] J. Pariente, F. Boussu, and F. Veyet, "New 3D Textile Composite Protection against Armour Piercing Ammunitions," in *4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion*, Bangkok, Thailand, 3–4 July 2012.
  - [37] Hexcel corporation, "HexPly® M10R/38%/UD300/CHS - résine Epoxy," Fiche technique produit version : a, 09/2012.
  - [38] I.S. Chocron Benloulou and V. Sanchez Galvez, "A new analytical model to simulate impact onto ceramic-composite armors," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 461–471, 1998.
  - [39] I.S. Chocron Benloulou, V. Sanchez Galvez, and J. Rodriguez, "A simple analytical model for ballistic impact in composite," *Journal de physique IV*, vol. 7, no. C3, pp. 821 – 826, Août 1997.
  - [40] N.K. Naik, S. Kumar, D. Ratnaveer, M. Joshi, and K. Akella, "An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armors," *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 22, no. 2, pp. 145–187.



- [41] A. Tasdemirci, I.W. Hall, B.A. Gama, and M. Guden, "Stress Wave Propagation Effects in Two and Three-layered Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, vol. 38, no. 12, pp. 995-1009, 2004.
- [42] N. Nayak, A. Banerjee, and P. Sivaraman, "Ballistic Impact Response of Ceramic-faced Aramid Laminated Composites Against 7.62 mm Armour Piercing Projectiles," *Defence Science Journal*, vol. 63, no. 4, pp. 369-375, July 2013.
- [43] J. Grogan, S.A. Tekalur, A. Shukla, A. Bogdanovich, and R.A. Coffelt, "Ballistic Resistance of 2D and 3D Woven Sandwich Composites," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 9, pp. 283-302, 2007.
- [44] NATO Standardization Agency (NSA), "STANAG 2920 (Edition 2) - Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing," Brussels, Belgium, Norm 2003.
- [45] E.S. Greenhalgh, V.M. Bloodworth, L. Iannucci, and D. Pope, "Fractographic observations on Dyneema composites under ballistic impact," *Composites: Part A*, vol. 44, pp. 51-62, 2013.
- [46] B.A. Cheeseman and T.A. Bogetti, "Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates," *Composite Structure*, vol. 61, pp. 161-173, 2003.
- [47] F. Boussu, V. Begus, X. Flambard, and X. Legrand, "Une nouvelle solution textile pour le renforcement des structures composites utilisées en protection balistique - Application au blindage de véhicule terrestre et aéroporté," *Textile à Usage techniques*, no. 65, pp. 24 - 26, Septembre 2007.
- [48] F. Boussu, V. Begus, X. Flambard, and X. Legrand, "A new textile solution for ballistic protection applied to aircraft and land armour plated vehicles," in *2nd International Workshop Design - Innovation - Development*, Iasi, Romania, 31th of August to 3rd of September 2007, pp. 30-38.
- [49] F. Boussu, V. Begus, X. Flambard, and X. Legrand, "A new textile solution for anti-ballistic composite," in *Autex 2007 - the 7th Annual Textile Conference*, Tampere, Finland, 26-28 June, 2007.
- [50] F. Boussu, V. Begus, X. Flambard, and X. Legrand, "A new textile solution for anti-ballistic composite," in *TechTextil Symposium, Composite Material session 13th of June 2007*, Frankfurt, Germany, 11 - 14 June 2007.
- [51] F. Boussu, "Solutions textiles pour la protection balistique - Application au blindage des véhicules terrestres ou aéroportés," in *FUTEX*, Marcq en Baroeul, France, 10 et 11 janvier 2007.
- [52] F. Boussu, V. Begus, and J.L. Petitniot, "Composite textile structure for ballistic protection," in *Industrial Simulation Conference, Eurosis - ETI Publication*, University of Palermo, Italy, June 5 - 7 2006, pp. 330-332.
- [53] F. Boussu, "The use of warp interlock fabric inside textile composite protection against ballistic impact," *Textile Research Journal*, vol. 81, no. 4, pp. 344-354, March 2011.
- [54] F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Energy absorption inside a 3D Textile Composite Structure," in *The Fiber Society Spring 2008 Conference*, Mulhouse, France, May 14-16, 2008.
- [55] F. Boussu and X. Legrand, "Delamination behaviour of 3D Warp Interlock Structures," in *First world conference on 3D fabrics and their applications*, University of Manchester, UK, April 10-11 2008.
- [56] F. Boussu and V. Begus, "Method of manufacturing a composite, especially a bulletproof composite, and composite obtained," EP 2.153.159, Dec. 8, 2010.
- [57] F. Boussu and V. Begus, "Method of manufacturing a composite, especially a bulletproof composite, and composite obtained," WO 152337 A1, Dec. 18, 2008.
- [58] F. Boussu and V. Begus, "Procédé de fabrication d'un matériau composite, notamment pour la protection balistique, et matériau composite obtenu," FR 755511, June 07, 2007.
- [59] A. Bhatnagar, L.C. Lin, and H.W. Chang, "Ballistic energy absorption of composites," in *22nd International SAMPE Technical Conference*, 1990, pp. 1-13.
- [60] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Analysis on failure mechanisms of an interlock woven fabric under ballistic impact," *Engineering Failure Analysis Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 2179-2187, December 2011.
- [61] S.J. Bless and D.R. Hartman, "Ballistic Penetration of S-2 Glass Laminates," in *21st SAMPE Technical Conference*, September 1989, pp. 852-866.
- [62] G. Dorey, "An overview of impact damage in composites," in *International conference mechanical properties materials at high rates of strain - Conference series - Institute of physics*, 1989, pp. 395-402.
- [63] A. Vasudev and M. Mehlman, "A Comparative Study of the Ballistic Performance of Glass-Reinforced Plastic Materials," *SAMPE Quarterly*, vol. 18, no. 4, July 1987.
- [64] M.K. Bannister, P. Callus, A. Nicolaidis, and I. Hetzberg, "The effect of weave architecture on the impact performance of 3D woven composites," in *TexComp Fourth International Symposium for Textile Composites*, Japan, 1998, pp. 21-27.
- [65] E. Ayax, "Caractérisations expérimentales et modélisation du comportement d'une plaque composite tissée en regime balistique," Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, Paris, France, thèse de doctorat 19/07/1993.
- [66] N. Cristescu, L.E. Malvern, and R.L. Sierakowski, "Failure mechanisms in composite plates impacted by Blunt-Ended Penetrators. Foreign object Impact damage to composites," *ASTM STP 568*, pp. 159-172, 1975.
- [67] C.A. Ross and R.L. Sierakowski, "Studies on the impact resistance of composite plates," *ASTM*, pp. 157-161, 1973.
- [68] R.L. Sierakowski, Chiao, 1976, pp. 73 - 88.
- [69] F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "A model of energy absorption using multi-layers fabrics to improve ballistic impact fracture," in *18th DYMAT Technical Meeting*, Bourges, France, September 10-12, 2008, pp. 141-146.
- [70] G.M. Savage, "Fabric and fibre reinforced laminate armours," *Institute of Metal and Materials in defense*, pp. 285-290, 1989.
- [71] G. Dorey, "Fracture of composite and damages tolerance," *Agards lecture*, no. series n°124, 1987.
- [72] US Army research laboratory, "MIL-PRF-46103E, Performance specification armor: lightweight composite, Type III 12.7 mm (0.50 caliber), Class 2B - Hard steel core armor piercing (AP) projectile at 500 meters range (2000 ft (610 m) per second)," Military Norm 6 January 1998.
- [73] M. Lefebvre, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules," Université de Valenciennes, Valenciennes, France, Thèse de doctorat 07/12/2011.

- [74] F. Boussu, F. Veyet, and M. Lefebvre, "Recent advances in textile composite for impact protection," *World Journal of Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 53-66, 2010.
- [75] F. Boussu, F. Veyet, and M. Lefebvre, "Recent Advances in Textile Composite for Impact Protection," in *NATO Advanced Research Workshop on Textile Composites*, Kiev, Ukraine, May 18-21, 2009, pp. 5 -6.
- [76] NATO Standardization Agency (NSA), "STANAG 4569 Land (Edition 1) - Niveaux de protection à assurer aux occupants des véhicules logistiques et des véhicules blindés légers," Brussels, Belgium, Norme NSA/0533-LAND/4569, 24/05/2004.
- [77] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Study of impact behaviour of three warp interlock structures. Comparison with existing protections," in *LWAG Light-Weight Armour for Defence & Security*, Haifa, Israël, March 2011.
- [78] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Influence of warp interlock parameters on the ballistic behaviour of a structure," in *10th International Conference on Textile Composites*, Lille, France, October 26–28, 2010, pp. 322-328.
- [79] M. Lefebvre, B. Provost, and F. Boussu, "Behaviour of warp interlock structures under and IEDs attack, application to orthogonal and through the thickness warp interlocks," in *NATO Advanced Study Institute "Defence Related Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC (Nuclear, Biological, Chemical) Protection"*, Split, Croatia, Tuesday 6th April to Friday 16th April 2010.
- [80] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Influence des paramètres de tissage sur des structures interlock soumises à l'impact balistique," in *JNC 17, Journées Nationales Composites*, Poitiers, France, 15 au 17 Juin 2011.
- [81] B.L. Lee, J.W. Song, and J.E. Ward, "Failure of Spectra® Polyethylene Fiber-Reinforced Composites under Ballistic Impact Loading," *Journal of Composite Materials*, vol. 28, pp. 1202-1226, 1994.
- [82] N. Nayak, A. Banerjee, and D. Datta, "Ultrasonic Assessment of Bullet Inflicted Damage in Aramid Laminated Composites," *Defence Science Journal*, vol. 62, no. 3, pp. 153-158, May 2012.
- [83] B. Provost, "Développement d'un tissu balistique contre les fragments à haute vitesse," ISL, Saint Louis, France, Projet de fin d'études 2009.
- [84] B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, D. Vallee, and F. Rondot, "New 3D warp interlock composite for armouring of vehicles," in *4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion*, Bangkok, Thailand, 3-4 July 2012.
- [85] M. Lefebvre, F. Boussu, D. Coutellier, and D. Vallee, "Influence of the geometrical structures and resin rate inside composites structures on the ballistic behaviour under high velocity impact," in *Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures*, Politecnico di Torino, Italy, 18-20 June 2012.
- [86] B. Provost et al., "Armouring solutions against high velocity impact using 2D laminates and 3D warp interlock composites," *Journal of Industrial Textile*, vol. 43, no. 4, Apr 1, 2014.
- [87] M. Lefebvre, F. Boussu, D. Coutellier, and D. Vallee, "Influence of the vacuum resin process, on the ballistic behaviour of lightweight armouring solutions combining aluminium plates and warp interlock fabrics impacted with a Fragment Fragment Simulating Projectile," *EPJ Web of Conferences*, vol. 26, 2012.
- [88] B. Provost et al., "High velocity impact on different hybrid architectures of 2D laminated and 3D warp interlock fabric composite," *EPJ Web of Conferences*, vol. 26, 2012.
- [89] B. Provost, F. Boussu, and D. Coutellier, "2D and 3D warp interlock composites under high velocity impacts," in *4th World conference on 3D fabrics and their applications*, Aachen, Germany, September 10th – 12th, 2012.
- [90] B. Provost, F. Boussu, and D. Coutellier, "2D laminated and 3D warp interlock fabric under high velocity impact," in *ICCE-19: 19th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering*, Shanghai, China, July 24-30, 2011.
- [91] B. Provost et al., "Études des différents dommages causés par un impact haute vitesse sur des composites à renforts 2D et 3D," in *Rencontre du Groupe de Travail MécaDymat, Comportement et rupture des matériaux sous sollicitations dynamique*, Lyon, France, Du 3 au 4 mai 2012.
- [92] B. Provost et al., "Comparison of damages on 2D and 3D warp interlock fabric due to high velocity impact," in *Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures*, Politecnico di Torino, Italy, 18-20 June 2012.
- [93] F. Boussu, B. Provost, D. Coutellier, D. Vallee, and F. Rondot, "New 3D textile composite hybrid solutions against high velocity impact," in *SAMPE Tech 2012*, North Charleston, SC, USA, October 22-25 2012.

## Conclusion Générale

L'ensemble de ces travaux de recherche vise à mieux définir et comprendre les paramètres de produit et de procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines. Initialement, sur la base de la représentation géométrique existante des tissus 3D interlocks chaines, un complément de désignation de ces structures, fondé sur des critères discriminants des paramètres de produit et de procédé de fabrication, a permis d'aboutir à une classification des structures tissées plus précise.

Fort de cette représentation géométrique des tissus, reconnue universellement par la théorie des armures, et sur la base de notre classification et définition précise des structures 3D interlocks chaines, nous avons pu définir l'ensemble des tissus 2D et 3D créés lors de nos différents projets de recherche. Cette représentation générale des tissus 3D interlocks chaines permet de concevoir les structures tissées en fonction des orientations possibles des fils de chaîne et trame, et surtout permet de s'adapter aux paramètres du procédé de fabrication lors de l'étape de tissage.

L'observation des tissus, par le biais de vues en coupe des fils de chaîne et trame, nous a permis de révéler la complexité interne de la géométrie des structures tissées, ce qui révèle la relation de dépendance importante entre les paramètres propres au procédé de tissage et les propriétés physiques et d'architectures des tissus 3D interlocks chaines.

Nous avons pu observer, dans nos divers travaux de recherche, les différentes représentations réelles des tissus 2D et 3D par le biais de deux procédures expérimentales; l'une consistant à observer à l'aide d'un microscope les caractéristiques des renforts résinés; l'autre consistant à observer les structures tissées sans apport de résine par le biais d'images obtenues, par tomographie à rayons X, afin d'obtenir une visualisation 3D des tissus permettant d'explorer la structure tissée dans toutes les directions. En utilisant cette dernière technique, nous avons pu observer l'évolution de la section des fils de chaîne et trame en fonction de leur position au sein du tissu 3D interlock chaîne. Ces résultats nous ont apporté une classification des différentes formes principales de sections des fils de chaîne et trame nous permettant d'optimiser les zones de représentation des géométries des fils de la structure tissée multi-couches.

L'observation des tissus, par le biais de vues en coupe des fils de chaîne et trame, a permis de révéler la complexité interne de la géométrie des structures tissées, dépendante des nombreux paramètres du tissu mais également liée aux paramètres du procédé de fabrication. En effet, nous avons pu montrer l'influence du montage des fils de chaîne sur la machine à tisser, notamment à travers le peigne, et de leur sélection au cours du tissage sur la géométrie finale tissée. L'influence de la densité de fils de chaîne sur la géométrie finale des tissus 3D interlocks chaines ainsi que celle du choix de l'architecture sur l'évolution du positionnement et de la forme des fils ont été démontrées.

Par ces résultats de recherche, nous pouvons mesurer l'incidence des paramètres produit et procédé de fabrication sur les modifications de géométrie des tissus 3D interlocks chaines, ce qui nous révèle la relation de dépendance importante entre les paramètres propres au procédé de tissage sur les propriétés physiques et architectures des tissus 3D interlocks chaines.

Cette géométrie des tissus 3D interlocks chaines permet d'aboutir à une structure intègre et monolithique, anisotrope en termes de propriétés, mais capable de se déformer globalement et localement par pliage ou mise en forme sans modification de l'intégrité initiale de l'architecture tissée.

Dans le cadre de nos différents travaux de recherche, nous avons montré les capacités de déformation des architectures de tissus 3D interlocks chaines lors des procédés de pliage et de mise en forme. Les premiers résultats obtenus nous révèlent l'influence combinée à la fois du pas et de la profondeur de liage sur l'anisotropie de propriétés des architectures testées. Ainsi, l'architecture tissée 3D proche du type de liage couche à couche avec une profondeur de liage limitée et présentant un nombre réduit de points d'entrecroisement des fils de chaîne et trame, permet de conserver l'intégrité et l'homogénéité de la géométrie initiale par une consommation des fils de chaîne et trame au sein de la structure tissée.

Les variations observées des épaisseurs des tissus 3D interlocks chaines montrent également des comportements locaux entre les fils de chaîne et les fils de trame conduisant soit à une déformation hors du plan du tissu ou soit une compression du tissu. L'utilisation d'un renfort fibreux de type tissu 3D interlock chaîne nécessite l'application d'un effort de compression globale lors du processus d'imprégnation par de la résine afin de minimiser l'hétérogénéité de répartition de la résine dans les différentes zones du tissu 3D interlock chaîne ainsi déformé.

En considérant l'ensemble de ces résultats, la diversité des paramètres produits définissant la géométrie d'un tissu 3D interlock chaîne ne permet pas d'identifier des propriétés spécifiques; mais peut conduire à définir des tendances fortes en terme de comportement mécanique. Ainsi, l'influence de l'architecture du tissu 3D interlock chaîne sur les propriétés mécaniques dans les 3 directions principales définies par : les fils de chaîne de renfort, les fils de trame et les fils de liage dans l'épaisseur permet d'aboutir à une structure intègre et monolithique tout en se révélant fortement anisotrope en termes de propriétés.

La compréhension des phénomènes dynamiques des éléments de la machine à tisser en contact avec les fils chaîne et trame du tissu a fait l'objet de diverses approches d'observations et d'analyse. L'observation combinée des séquences en vidéos rapides du mouvement des fils de chaîne avec les mesures in-situ et en temps réel des fils capteurs au cours du procédé de fabrication a permis de retrouver l'incidence du mouvement périodique des cadres sur la distribution cyclique des contraintes sur les fils. De plus, les différentes mesures effectuées sur les différents fils capteurs ont mis en évidence la non homogénéité

des valeurs de contraintes appliquées aux fils par les différents types de cadre, en raison de positionnements variés dans la profondeur de la foule. Dans le cadre de la production de tissu 3D interlock chaîne à base de fils de verre E sur la machine à tisser industrielle, il a été montré que la position basse des cadres est plus contraignante pour les fils de chaîne en terme de tension et de dégradation par frottement-avec les lances rigides bi-latérales d'insertion des fils de trame.

Le modèle de la cinématique de tissage a permis de reproduire par simulation numérique la dynamique de la formation du tissu d'une machine à tisser industrielle. Les caractéristiques géométriques principales des tissus produits sur la machine à tisser virtuelle sont en accords avec leurs équivalents produits sur la machine à tisser réelle. En ce qui concerne la simulation des étapes principales de formation d'un tissu, les représentations du flotté des fils, de la forme des sections transversées pour le tissu d'armure toile et des zones de contact entre les fils de trame et les fils de chaîne sont fortement similaires aux observations réelles sur machine à tisser industrielle.

La géométrie particulière des structures tissées 3D interlocks chaînes nécessite : d'adapter la machine à tisser en vue d'optimiser les différences d'évolutions et de consommation des fils de chaîne, de positionner dans l'épaisseur du tissu les différents fils de chaîne de renfort ainsi que les différents fils de trame permettant de constituer le nombre de couches souhaité, et de choisir judicieusement les options de montage des fils de chaîne pour réaliser les architectures tissées 3D interlocks chaînes. S'ajoute à cela, la complexité de la mise en tension régulière et homogène de l'ensemble des fils de chaîne par l'utilisation de fils de type multi-filaments continus, avec ou sans torsion, ayant des valeurs d'allongement inférieures à 1%. Les fibrilles, issues des filaments de carbone et créées lors du frottement dynamique entre les fils lors du tissage, sont dispersées sur les différents éléments de la machine à tisser, nécessitant une étanchéité complète de toutes les parties électriques.

La vitesse de production de la machine doit alors s'adapter à ces conditions supplémentaires de réalisation des tissus 3D interlocks chaînes afin d'éviter des dégradations plus ou moins importantes des fils de chaîne et trame au cours des mouvements dynamiques de la machine à tisser. Ces adaptations du procédé de fabrication doivent être conçues pour minimiser l'endommagement matière, se traduisant par la dégradation des fils lors de la production des tissus 3D interlocks chaînes.

A l'issue de différentes études de recherche, nous avons constaté l'influence du procédé de fabrication sur la dégradation des fils lors du procédé de tissage des architectures tissées 3D interlocks chaînes. Différentes solutions ont été envisagées pour minimiser la dégradation des fils, en adaptant le procédé aux types de matière première des fils et de leur constitution (mono ou multi-filaments): réduction de la vitesse de tissage et des zones de frottement entre fils (système de guidage individuel des fils par planches d'empoutage, barres de sélection) et le recours à des ensimages (lubrification des fils). Nous avons proposé également des matériaux, pour les éléments de la machine à tisser en contact avec les fils, à faible coefficient de frottement, ainsi que le réglage individuel de la tension des fils de chaîne ayant les mêmes évolutions au sein de la structure tissée.

Par le biais de notre analyse bibliographique et également selon nos propres résultats de recherche, nous avons pu identifier les propriétés mécaniques caractéristiques des tissus 3D interlocks chaînes telles que: la résistance au délaminage et la résistance à l'impact. Une première explication succincte de la combinaison globale et locale des déformations du tissu 3D interlock chaîne soumis à l'impact a été abordée montrant l'influence, aux échelles du fil et de la structure tissée, des paramètres de produit sur la diffusion de l'énergie d'impact et son mode d'absorption par le tissu 3D interlock chaîne.

Le phénomène d'impact sur un tissu et la compréhension du mode de comportement associé reste avant tout un évènement complexe par son caractère dynamique, mais aussi par l'influence de multiples paramètres. En effet, la caractérisation à l'échelle dynamique des phénomènes nécessite une instrumentation fiable pour permettre des mesures correctes et suffisamment précises des mouvements et déformations à vitesse rapide des matériaux. Nous avons souligné également les différentes études existantes qui nous ont permis de converger vers un modèle de comportement d'un tissu à l'impact dépendant de paramètres propres au tissu (nature et type des fils, épaisseur, architecture, type d'armures, densité des fils de chaîne et trame), mais aussi exogènes (fixation et orientation du tissu, inclinaison de la cible, forme et vitesse du projectile). Par le biais de ces observations nous avons pu modéliser le comportement dynamique d'un tissu soumis à des impacts balistiques et mesurer l'influence des paramètres du fil et tissu sur la capacité d'absorption de l'énergie cinétique d'impact. Ainsi, nous avons souligné l'importance de caractériser dynamiquement les propriétés mécaniques du fil, tels que le module de Young ou le module de cisaillement, mais aussi le coefficient de frottement de type fils/fils et fils/projectile pour alimenter les paramètres du modèle numérique du tissu à l'impact.

La capacité de déformation dynamique résultante d'une structure textile souple, à base de tissu 3D interlock chaîne, tend à favoriser l'absorption de l'énergie d'impact initiale. Les paramètres du tissu 3D interlock chaîne, tels que : l'homogénéité des densités de fils de chaîne et trame, le nombre de couches d'un tissu 3D interlock chaîne et le titrage des fils de chaîne et trame, contribuent à cette capacité d'absorption de l'énergie d'impact.

Dans le cadre des travaux de recherche menés sur les solutions de protection souple à l'impact utilisant un matériau textile seul ou couplé avec un matériau céramique, nous avons identifié différentes architectures textiles, et notamment les tissus 3D interlocks chaînes, pour répondre à l'impact des diverses menaces à différentes vitesses. La solution de l'empilement de tissus 2D à base de fils de para-aramide et de fils de Nickel-Titane, positionnés en face arrière d'une partie dure en céramique, a permis de révéler la capacité d'amortissement de la structure tissée lors de multi-impacts de projectiles de type 7,62 mm non perforante (9,7 g à 838 m/s) et mono-impact d'une munition de type 7,62 mm perforante (10,8 g à 868 m/s). Cependant les valeurs de la déformation arrière après impact se sont révélées supérieures à 44 mm, et donc non conformes, aux valeurs

requis par les niveaux III et IV de la norme NIJ 0101-06 [1]. Pour une menace de type balle de 9 mm FMJ RN à 350 m/s du niveau II de la norme NIJ 0101-06 [1], la solution d'assemblage par couture des différents plastrons de tissu 2D à base de fils para-aramides a permis d'y répondre, tout en apportant une solution d'adaptation d'un gilet pare-balles à la morphologie féminine. Enfin, l'hybridation de solutions textiles comprenant notamment des tissus 3D interlocks chaines à base de fils para-aramides 840 dTex a permis de répondre à la menace d'un FSP de diamètre 5,4 mm (masse 1,1 g) selon la norme STANAG 2920 [2] à une vitesse V50 de 575,9 m/s (supérieure à la valeur de référence de 550 m/s). Par contre la valeur de la déformation arrière après impact de la solution textile obtenue est de 32,1 mm (valeur supérieure à l'objectif initial de 25 mm). Ces résultats montrent la difficulté à identifier des solutions ayant des capacités d'absorption de l'énergie d'impact, tout en ayant une capacité de déformation dynamique limitée, pour minimiser la hauteur de pénétration autorisée de l'ensemble projectile/protection souple dans le corps humain, en tant que solution de protection de type gilet pare-balles.

Cette capacité de déformation dynamique des tissus 3D interlocks chaines, en tant que renfort fibreux d'un matériau composite d'une solution de protection dure à l'impact, s'accroît en considérant un faible taux de résine au sein de la structure tissée. A chacune de ces différentes menaces à l'impact dépend un type de matériau spécifique, dont un ensemble de paramètres de produit contribue à définir le mode de comportement adapté, tels que : la nature et le type de fils utilisés, l'architecture et le nombre de couches du tissu 3D interlock chaîne, les densités des fils de chaîne et trame, le type de résine et son procédé associé.

Dans le cadre des travaux de recherche menés sur les solutions de protection dure à l'impact utilisant un matériau composite seul ou un couplage de matériaux, nous avons pu révéler l'intérêt des structures composites textiles, et notamment celles intégrant des tissus 3D interlock chaîne. En effet, la capacité de déformation dynamique plus importante de cette structure apparaît plus adaptée pour absorber l'énergie d'impact, comme nous avons pu le montrer avec les solutions couplées avec un matériau céramique face à une munition de type 12,7 mm (masse 43 g) à 610 m/s [3] ou celles couplées avec des matériaux métalliques face à une menace de type FSP (diamètre 20 mm, masse 54 g) à 630 m/s [4] et 1600 m/s [5]. A chacune de ces différentes menaces dépend un type de matériau composite spécifique, dont un ensemble de paramètres endogènes contribue à définir le mode de comportement à l'impact adapté, tels que : la nature et le type de fils utilisés, l'architecture et le nombre de couches du tissu 3D interlock chaîne, les densités des fils de chaîne et trame, le type de résine et son procédé associé.

Les travaux de recherche effectués au cours de toutes ces années m'ont permis de mieux comprendre la complexité des tissus 3D interlocks chaines et de révéler l'interaction très forte du procédé de fabrication sur les propriétés du matériau tissé. Les applications déclinées, soit en tant que renfort fibreux dans des matériaux composites pour des protections dures ou pour des pièces allégées et mises en forme, ou soit en tant que tissu pour des applications de protection souple, nous ont permis de montrer l'intérêt de ces tissus 3D interlocks chaines en tant que solutions de ces différentes applications.



# Perspectives

L'ensemble de ces travaux de recherche sur les tissus 3D interlocks chaines, nous ont conduit à de nombreux résultats, mais nous mène également à autant de poursuites de travaux de recherche. Ces futurs travaux de recherche peuvent se regrouper autour de trois thématiques principales.

Cette première thématique englobe différents travaux et s'oriente vers la classification des structures tissées interlocks, suffisamment exhaustive, comprenant différents paramètres de produit des tissus 3D interlocks chaines pour mieux orienter la conception des préformes tissées à architecture complexe. En effet, la désignation actuelle des tissus 3D interlocks chaines s'applique essentiellement aux structures tissées à évolution constante du fil de chaîne de liage dans l'épaisseur de la structure tissée, mais ne prend pas en compte les évolutions de géométries hybrides en termes de pas et de profondeur de liage.

De futurs travaux de recherche peuvent être effectués sur une classification suffisamment exhaustive des structures tissées 3D interlocks chaines comprenant différents types de fils et paramètres endogènes des tissus pour mieux orienter la conception des préformes tissées à architecture complexe. Cela permettra de sélectionner dans cette classification, les liages compatibles entre eux pour être insérés au sein d'une même préforme tissée nécessitant une réduction d'épaisseur entre deux parties tout en conservant le même nombre de fils de chaîne de liage (optimisation par changement du nombre de fils de trame, du type d'architecture conduisant à des adaptations géométriques en fonction des directions principales de la structure tissée, ajout de différents fils avec des titrages permettant d'obtenir des dimensions différentes).

Cette classification des tissus 3D interlocks chaines pourra être complétée par une représentation matricielle de ces structures tissées selon les trois directions principales des fils.

Afin de faciliter cette classification, nous pouvons proposer une démarche de reconnaissance automatique des contours des fils sur la base des images tomographiques 3D et par la suite d'utiliser une méthode de classification rapide d'analyse d'images de type K-means (ou C-classes moyennes) pour identifier le nombre de classes minimum à considérer en fonction d'un critère de représentativité de la structure tissée réelle.

La deuxième thématique regroupe toutes les études nécessaires pour mieux connaître les propriétés des tissus 3D interlocks chaines dépendants des paramètres de produit et de procédé de fabrication. Nous pouvons poursuivre les études relatives à la compréhension de l'influence des paramètres de procédé de fabrication sur la géométrie et les contraintes résiduelles des tissus 3D interlocks chaines, par le biais des outils numériques couplés à des résultats expérimentaux. Nous pouvons également envisager d'utiliser un modèle numérique d'une architecture de tissu 3D interlock chaîne et faire varier les différents paramètres produits pour en connaître les propriétés mécaniques résiduelles, tout en les comparant aux valeurs expérimentales. Les domaines d'applications peuvent se focaliser sur les capacités de déformation statique lors de procédés de pliage et de mise en forme.

Pour cela, nous pouvons envisager de faire varier les autres paramètres du procédé de fabrication définissant les paramètres produits pour compléter la compréhension globale de leur influence sur l'architecture finale des tissus 3D interlocks chaines. Sur la base des outils actuels, tels que Pointcarré [1] ou DesignScope [2], permettant la représentation géométrique des tissus 3D interlocks chaines à partir des armures de base de liage des fils de chaîne et trame par couche, nous pouvons également les coupler à notre outil de simulation numérique de la cinématique du procédé de tissage [3] afin de prendre en compte le comportement matériau des fils et leurs déformations issues de la fabrication d'un tissu. Cela peut contribuer à la réalisation d'une chaîne numérique complète des structures tissées 3D interlocks chaines, depuis les fils jusqu'au tissu produit, permettant d'alimenter les outils de simulation numérique des structures composites à base de ces renforts fibreux.

Nous proposons également de compléter l'approche de classification des tissus 3D interlocks chaines, afin de prendre en compte l'ensemble des différents types d'architecture réalisable sur machine à tisser, pour tenter d'identifier une définition précise fondée sur des paramètres produits discriminants.

Dans le cadre de travaux futurs, il serait intéressant de mesurer l'influence du type de liage sur les modes de rupture (types I, II, III) en considérant différents matériaux fibreux (mono filaments ou multi-filaments), différents titrage de fils et variation des densités chaîne et trame, mais également la densité des fils de chaîne de liage par unité de volume de la géométrie du tissu 3D interlock chaîne, et aussi le type d'architecture tissée par son mode de liage, son pas et sa profondeur de liage.

Lors de la mise en forme des tissus 3D interlocks chaines, nous proposons également d'adapter les réductions des fils de chaîne et trame ainsi qu'intégrer différents types de titrage de fils de même nature de façon localisée pour anticiper les modifications d'épaisseur de la structure tissée en fonction des types de déformation. Nous pouvons également combiner plusieurs types d'architectures, au sein d'une même structure tissée 3D interlock chaîne, de façon à positionner les types de liage les plus adaptés dans les différentes zones de déformations locales identifiées lors du procédé de mise en forme.

Afin d'améliorer la caractérisation in-situ des tissus 3D interlocks chaines, nous pouvons envisager d'insérer différents fils capteurs dans les deux directions chaîne et trame ainsi que dans l'épaisseur de la structure tissée 3D interlock chaîne au niveau des différentes couches pour les fils de chaîne de renfort et les fils de trame, afin de mesurer les déformations locales lors de la mise en forme dans le sens de l'épaisseur. De nouveaux fils capteurs seront conçus, afin d'améliorer leurs sensibilités tout en conservant leurs valeurs de résistance initiale faibles et permettre de détecter des niveaux de contraintes mécaniques de plus faible intensité.

Dans le cadre de travaux futurs, nous envisageons d'adapter le modèle de la cinématique de la formation d'un tissu aux structures tissées 3D interlocks chaines, nous permettant ainsi de mieux comprendre les modes de déformation de la géométrie globale du tissu 3D interlock chaîne par la dynamique de fabrication. Le modèle peut également être amélioré en adaptant les lois de contact utilisées afin d'optimiser la déformation dans la section transverse des fils, mais aussi en ajoutant de la tension dans les fils de chaîne pour améliorer la déformation des sections transverses. Nous pouvons analyser l'influence des paramètres du procédé de fabrication à iso-architecture tissée (même armure, même densité et même types de fil) telles que : la hauteur de la foule ou la vitesse d'insertion du fil de trame, sur les modifications de géométrie du tissu.

Afin de compléter notre connaissance du procédé de fabrication, il serait intéressant d'instrumenter la machine à tisser industrielle par un ensemble de capteur de pression sur les différents éléments de la machine à tisser pour effectuer une analyse simultanée de l'ensemble des signaux de ces capteurs en fonction des différents paramètres de réglage de la production; tels que : la vitesse d'insertion, la valeur de tension des fils de chaîne, le type de foule et le type de tassement du peigne. Cette étude permettrait de classer, par intensité de pression exercée due à la dynamique des éléments en mouvements, les zones influentes sur l'endommagement des fils de chaîne et trame au cours du procédé de tissage.

Sur la base de nos connaissances du procédé de tissage et de sa conception, nous pouvons envisager de développer d'autres types de structures tissées multi-couches et multi-directionnelles (avec 4 orientations principales des fils de chaîne dans le plan :  $-45^\circ$ ;  $0^\circ$ ;  $+45^\circ$ ;  $+90^\circ$ ) de préformes à épaisseur et densités variables à partir d'une technologie Jacquard à sélection des lisses indépendantes, par moteurs pas à pas individuels, autorisant une variation de positions réglables pour former de multiples foulées de façon localisées et à différentes hauteurs. Nous pouvons également envisager la miniaturisation du procédé de fabrication pour s'adapter à la réalisation de tissu 3D interlock chaîne à l'échelle microscopique autorisant le tissage de filaments continus, de quelques micromètres de diamètre, dans les directions chaîne et trame du tissu.

La troisième thématique se focalise sur les futurs travaux de recherche permettant d'optimiser le mode de déformation d'une solution de protection souple ou rigide, à base de renfort fibreux de type tissu 3D interlock chaîne, sous impact à différentes vitesses de divers projectiles.

Aussi, dans le cadre de futurs travaux de recherche, nous pouvons envisager de mieux comprendre le comportement à l'impact des solutions textiles souples, comme le suggère Singletary et al. [4], et leurs modes de déformation dynamique par le biais d'un ensemble d'essais balistiques, en faisant varier les vitesses et géométries des projectiles, sur différentes solutions textiles dont les paramètres suivants peuvent être optimisés : type et nature des fils, paramètres et architecture des structures textiles. L'utilisation de notre modèle numérique du tissu nous permettra d'effectuer les différentes simulations à l'impact et réduire les temps et coûts de développement. Une amélioration du modèle numérique du tissu peut également s'envisager en améliorant les lois de contact entre les fils et en intégrant les valeurs des propriétés des fils caractérisés dynamiquement.

Cette compréhension du comportement à l'impact des structures textiles souples peut s'envisager en intégrant des fils capteurs sensibles aux déformations rapides pour mesurer les déformations du tissu lors d'un impact. Fort de cette connaissance in-situ et en temps réel lors de l'impact, des modèles numériques adaptés aux structures textiles souples permettront d'identifier par simulation les paramètres endogènes aboutissant à une protection et une déformation arrière minimale. Nous pouvons également envisager de coupler un modèle numérique de comportement dynamique d'un corps humain pour estimer les incidences traumatiques des différentes hauteurs de pénétration de l'ensemble projectile/protection souple sur les différentes parties non homogènes du corps humain lors d'essais balistiques numériques. Enfin, dans une perspective de recherche à moyen terme, nous pouvons envisager de proposer des structures textiles à orientation multi-directionnelles des fils sur la base de tissu à 4 directions de fils ( $-45^\circ$ ;  $0^\circ$ ;  $+45^\circ$ ;  $90^\circ$ ) jusqu'à s'approcher des formes de toile d'araignée.

En complément de ces travaux futurs d'optimisation, les méthodes de mesure actuelles ne permettent pas d'observer précisément le comportement à l'impact de ces structures composites et notamment in-situ à l'échelle macroscopique. Aussi, dans le cadre de travaux futurs, l'intégration de fils capteurs permettant de mesurer dynamiquement des déformations en temps réel, lors d'un impact, et insérés au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne, répartis par couche à égale distance dans les deux directions chaîne et trame et dans l'épaisseur, peut apporter une connaissance plus approfondie du mode de comportement à l'impact.

Nous pouvons proposer des solutions textiles composites pour répondre à d'autres types de menace, telles que : les ondes de choc résultantes d'une explosion et les projectiles à très hautes vitesses (de 1 à 2 km/s pour des impacts de débris sur structure spatiale, type satellite).

Toutes ces perspectives de recherche sur les tissus 3D interlocks chaines pourront s'effectuer au sein d'une équipe, associant différentes compétences d'ingénieur et de technicien tissage, mais également des compétences dans le domaine du numérique et de la modélisation des structures ainsi que des compétences d'automaticien et d'informaticien industrielle pour la caractérisation dynamique et les mesures in-situ des structures tissées multi-couches.

[1] Pointcaré. (2008) Pointcaré softwares (Version 3.0.60). [Online]. [http://www.pointcarre.com/portfolio\\_item/dobby-software/](http://www.pointcarre.com/portfolio_item/dobby-software/)

[2] EAT GmbH. (2011) The DesignScope Company. [Online]. <http://www.designscopecompany.com/weave/>

[3] J. Vilfayeu, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," Thèse de doctorat 13/03/2014.

[4] J. Singletary and A. Bogdanovich, "3-D Orthogonal Woven Soft Body Armor," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 29, no. 4, pp. 287-305, January 2000.

# Carrière universitaire et professionnelle

## Sommaire

I.	Introduction .....	146
II.	Thématiques de recherche sur la période 1995 à fin 2005 .....	146
	A. Synthèse des travaux lors de ma thèse de doctorat .....	146
	B. Synthèse des travaux suite à ma thèse de doctorat .....	147
III.	Thématiques de recherche sur la période début 2006 à 2014.....	148
	A. Innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications sur les tissus 3D interlocks chaines .....	149
	B. Innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines .....	150
IV.	Bilan général de la valorisation scientifique .....	150
V.	Bibliographie .....	152

## I. Introduction

J'ai débuté mes premiers travaux de recherche, en 1992, lors de mon stage dans le cadre du DEA en Automatique et Informatique Industrielle de l'Université de Lille 1, intitulé : « optimisation d'une méthode de classification ascendante hiérarchique des ordres de fabrication d'une entreprise » [1].

J'ai poursuivi ma carrière professionnelle par un séjour de 18 mois au sein de la JBT, à Soliman (Tunisie), entreprise tunisienne filiale à 100% de la société Jean Bracq et Cie, en tant que Coopérant du Service National en Entreprise.

Par la suite, j'ai mis en place un outil informatique de suivi et de gestion de la production sous réseau, pendant 8 mois au sein de l'entreprise Victor Machu, à Béthencourt (France), en tant que directeur de production jusqu'en décembre 1994.

## II. Thématiques de recherche sur la période 1995 à fin 2005

En janvier 1995, mes travaux de recherche ont porté, dans le cadre d'une thèse de doctorat au sein du laboratoire GEMTEX, sur la simulation des flux matières et informationnels au sein de la filière Textile/Habillement, et se sont concrétisés sur le développement de nouveaux outils de prévision des ventes et de classification des articles textiles sur plusieurs saisons. Ces travaux, sous la direction de Christian Vasseur, ont fait l'objet d'un rapport de thèse de doctorat intitulé : Simulation de la filière Textile/habillement : réduction de la complexité en vue d'une meilleure prévision des ventes [2] et d'une soutenance le 12/01/1998. Le manuscrit de thèse se décompose en 4 chapitres : modélisation et simulation de la filière Textile/Habillement/Distribution, modèles et méthodes de prévision des ventes, apport de la classification pour la prévision et amélioration de l'approche de classification par les procédures génétiques.

### A. Synthèse des travaux lors de ma thèse de doctorat

Dans le premier chapitre, un modèle complet de la filière textile [3] a été réalisé par le biais des hypernets [4], réseaux de Pétri généralisés, afin d'analyser et de simuler différentes stratégies de planification prévisionnelle entre partenaires [5]. Cet outil de simulation [6], couplé au système de gestion interne de l'entreprise, repose sur une modélisation simple des principales fonctions de l'entreprise et permet ainsi de faciliter les flux de matériels et immatériels. Dans le deuxième chapitre, des exemples de méthodologies prévisionnelles appliquées à différents environnements textiles apportent un éclairage complémentaire sur les contraintes et conditions spécifiques d'utilisation d'un modèle pour la vente d'articles textiles [7]. Une application personnelle, à partir de 6 méthodes de prévisions évaluées par 5 mesures de l'erreur différentes sur des données de vente d'un confectionneur en relation avec un distributeur, permet d'identifier les méthodes de prévision les mieux adaptées et les plus précises à ce contexte économique spécifique. Dans le troisième chapitre, la problématique de la dimension de la procédure d'identification des modèles de prévision sur les séries temporelles des ventes d'articles textiles est abordée. Son objectif est d'extraire parmi l'ensemble des historiques de vente des articles, la quantité nécessaire et suffisante d'informations à partir de méthodes de classification, afin de l'intégrer au modèle de prévision adéquat [8]. Le caractère global ou local des informations extraites s'apprécie en fonction du degré de finesse souhaité pour l'analyse des séries temporelles. Ceci est rendu possible par l'utilisation de différents types de critères d'agrégation. Une étude sur les critères de validité des méthodes de classification est également abordée afin de choisir le nombre juste suffisant d'informations utiles [9]. Deux applications de méthodologie, traduisant différents objectifs de classification en fonction de la

formulation différente des critères d'agrégation [10], sont également présentées pour fournir des outils d'aide à l'analyse des données [11]. Enfin dans le quatrième chapitre, une amélioration des valeurs initiales des paramètres de notre approche de classification est rendue possible par l'utilisation de procédures génétiques. Cette méthode fondée sur la recherche d'une valeur minimale d'une fonction objective, traduisant l'objectif d'agrégation, repose sur l'utilisation d'une représentation par codage des différentes partitions envisageables. L'intérêt de l'utilisation des méthodes de classification par des procédures de transformations génétiques réside dans l'exploration des différentes solutions de classifications possibles et l'identification rapide de l'optimum global relatif à la formulation de la fonction objective choisie [12].

A l'issue de la soutenance de thèse de doctorat du 12 janvier 1998, j'ai été recruté au titre de maître de conférences dès le 01 octobre 1998 au sein de l'ENSAIT.

## B. Synthèse des travaux suite à ma thèse de doctorat

Suite à mon recrutement à l'ENSAIT en tant qu'enseignant chercheur, et rattaché au laboratoire GEMTEX, le thème de la classification et prévision des ventes des articles textiles a été dans la continuité de mes travaux de recherche initiés au cours de la thèse de doctorat.

Les perspectives de recherche issues de la thèse de doctorat ont permis de définir deux axes, l'un orienté vers une méthode d'identification de la saisonnalité des articles par l'utilisation d'une fenêtre glissante tout au long de la saison de vente [13], et l'autre orienté sur l'explication des comportements de vente d'articles textiles par le regroupement de variables qualitatives ou descriptives communes.

Le deuxième axe se fonde sur une réflexion plus profonde, menée conjointement depuis septembre 1998 avec mon collègue Jean-Jacques Denimal (MCF au laboratoire de Statistiques et de Probabilités de l'USTL), sur l'élaboration d'une méthode d'analyse statistique de comportement des profils de vente. Une première ébauche de cette méthode d'analyse [14] nous a permis d'expliquer une partie des comportements de vente d'articles textiles à partir des variables qualitatives disponibles [15]. Différentes améliorations successives de la méthode d'analyse ont été réalisées [16][17][18] et notamment par l'introduction de la régression PLS comme nouvel outil statistique [19].

Une amélioration de la précision des estimations des profils a également été obtenue en introduisant une méthode de régression par boules (ou des  $n$  plus proches voisins) au lieu d'une méthode de régression classique [20]. Enfin, l'apparition des saisonnalités des classes d'articles obtenues à partir des résultats d'estimations de la précédente méthode d'analyse statistique [21] apporte une aide à la compréhension des comportements de vente des articles textiles [18][22].

Cette méthode d'analyse a fait l'objet d'une collaboration forte avec Jean-Jacques Denimal de l'USTL pour la période de 1996 à 2003. L'année 2004 a été consacrée à l'écriture d'un outil logiciel intitulé TEXTILE ANALYSIS via un contrat OSEO [23] permettant aux deux chercheurs impliqués de fournir un logiciel de prévision des ventes adapté aux distributeurs d'articles textiles, testés en collaboration avec l'entreprise CAMAIEU.

L'objet du logiciel peut se résumer par la question suivante : Quels sont les facteurs influençant les profils de vente des articles textiles? Une étude réalisée sur des articles de sport a permis de montrer que parmi l'ensemble des facteurs déterminant le comportement de vente d'un article, nombre d'entre eux sont déjà connus avant que la saison de vente ne commence et permettent à eux seuls de retrouver le profil de vente d'une grande majorité d'articles (80% dans le cas de l'étude effectué avec la société CORAMY).

Considérant une saison de vente pour laquelle nous connaissons à la fois les quantités vendues de chaque article semaine par semaine et un ensemble de variables descriptives des articles (tissu, type, couleur, prix,.....), le logiciel a pour but :

- de déterminer, parmi ces variables, celles expliquant le comportement de vente des articles.
- de proposer, à partir de ces variables, une estimation des profils de vente des articles qui sera comparée aux profils réels. Ce qui permet de mesurer la précision avec laquelle l'utilisation de ces seules variables permet de retrouver les comportements de ventes qui ont été observés.

La méthodologie proposée présente les étapes suivantes (Figure 157):

- Étape 1: Classification de l'ensemble des articles suivant leurs profils de vente et obtention d'une partition de l'ensemble des articles en classes [24][25].
- Étape 2 : Tirages aléatoires d'articles dans chacune des classes obtenues de façon à partager l'ensemble de tous les articles en deux échantillons : Échantillon de base et Échantillon test.
- Étape 3 : Analyse factorielle du tableau croisant l'ensemble des articles et leurs variables descriptives, les articles de l'échantillon test étant placés en éléments supplémentaires. Extraction des facteurs les plus significatifs [26].
- Étape 4 : Régression PLS entre le tableau des profils de vente (variables à expliquer) et les facteurs obtenus à l'étape 3 (variables explicatives), les articles de l'échantillon test étant toujours placés en donnée supplémentaire. Extraction des facteurs PLS les plus significatifs.
- Étape 5 : Estimation des profils de ventes des articles de l'échantillon test et comparaison avec les profils réels par un test du CHI2 [27].

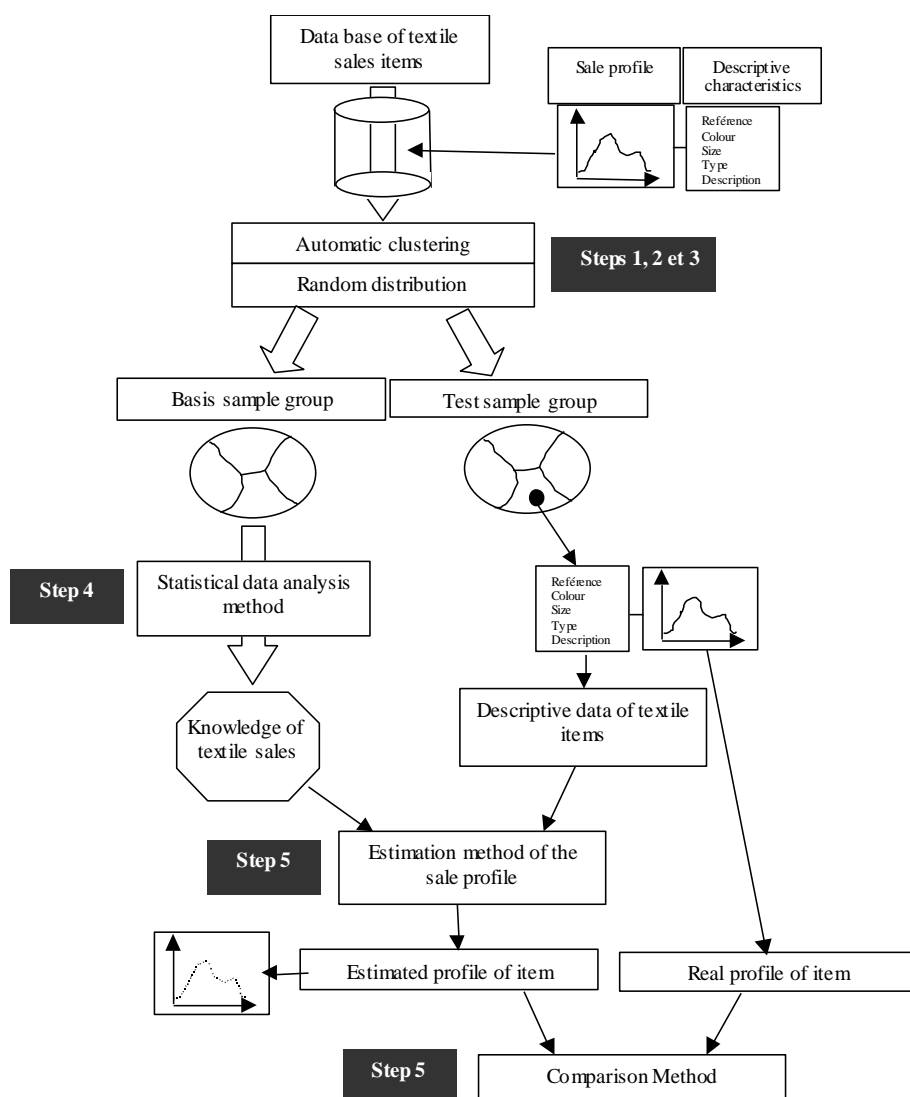


Figure 157. Description synthétique des différentes étapes du logiciel TEXTILE ANALYSIS [28].

Durant l'écriture du logiciel TEXTILE ANALYSIS, de nouveaux modèles statistiques ont été créés afin de répondre aux besoins d'analyse et de prévision des ventes des partenaires industriels (Société CORAMY et CAMAIEU). Ces modèles ont su s'adapter à des données de vente d'article textile, dont la quantité vendue par référence peut être faible sur des périodes très courtes et saisonnières, ce qui influe directement sur la fiabilité de la valeur des prévisions de ventes. De plus, sur une saison de vente de l'année précédente, le nombre de références des articles textiles et leurs déclinaisons en taille est relativement important par rapport aux quantités vendues, ce qui influe également sur la qualité du regroupement des informations par les méthodes de classification utilisées. Enfin, le quasi-renouvellement de l'ensemble des références d'une saison de l'année en cours par rapport à la saison de l'année précédente influe directement sur la stabilité du lien entre les classes d'articles de la saison précédente sur les classes d'articles de la nouvelle saison des ventes.

Pour toutes ces difficultés mentionnées et les nombreuses analyses et prévisions effectuées sur les ventes des articles textiles du partenaire distributeur CAMAIEU, le logiciel a permis d'apporter une méthodologie de classification des articles textiles et une meilleure compréhension des comportements globaux et locaux des ventes d'articles textiles. Cependant, pour des raisons de difficulté d'intégration au sein des systèmes informatiques couplées au changement de méthode de travail à apporter pour utiliser les différentes fonctionnalités du logiciel, une version industrielle de l'outil logiciel TEXTILE ANALYSIS n'a pas pu être intégrée. Ces complexités m'ont par conséquent amené à changer de thématiques de recherche en fin d'année 2005.

### III. Thématiques de recherche sur la période début 2006 à 2014

Les thèmes de recherche développés sur la période début 2006 - 2014 peuvent se dissocier en deux parties, l'une relative aux innovations de produit et de procédé de fabrication hors des applications des tissus 3D interlocks chaines, et l'autre relative aux tissus 3D interlocks chaines.



## A. Innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications sur les tissus 3D interlocks chaines

Parallèlement à mes activités de recherche sur l'analyse et les prévisions de vente et en complémentarité avec mes activités d'enseignement, la mise en œuvre de tissus techniques à base de fil métallique à propriété de mémoire de forme a été engagée conjointement avec mon collègue Jean-Luc Petitniot de l'ONERA en janvier 2000. Cette approche a été initiée par le projet de fin d'études de Bailleul [29], dont l'objet a été de concevoir un prototype d'insertion de fils de trame adapté à une machine à tisser permettant la fabrication à l'échelle industrielle de tissus techniques, en collaboration avec un industriel textile DUBAR WARNETON de la région Nord/Pas de Calais et l'ONERA de Lille.

A partir de ce prototype d'insertion de fil de trame pour machine à tisser, des projets de fin d'études (Jasaron [30] et Draoui [31]) ont consisté à développer des tissus à partir de fils à mémoire de forme (poly-cristallin de type Nickel Titane). Ces tissus, en tant que renfort fibreux de plaques composites utilisées en tant que peaux de structure sous-marine, ont montré des propriétés intéressantes d'amortissement des vibrations (provoquées par le bruit de moteur générant des longueurs d'ondes à basse fréquence) dans la phase de transition du matériau de l'état martensitique à l'état austénitique [32][33][34][35].

Poursuivant sur la lancée du développement des tissus à usage technique, différents travaux de recherche ont été menés sur des applications automobiles [36] par le développement de tissus chauffants comprenant des fils métalliques tissés, en tant qu'électrodes, et une enduction sur la surface du tissu chargée en particules conductrices de noir de carbone permettant la diffusion de la chaleur par effet résistif [37] ainsi que des tissus à mémoire de forme adaptés aux sièges [38][39].

Dans le projet de fin d'études de Desganes [40], une approche similaire de tissu chauffant a également été appliquée à la conception et réalisation d'un gant en y intégrant les contraintes supplémentaires de résistance à la flexion des fils métalliques intégrés dans un tissu.

Dans le projet de fin d'études de Sigaud [41], des lamelles de stores verticaux et horizontaux ont été réalisées à partir de tissus chauffants pour répondre à une offre innovante d'utilisation du store en complément ou en remplacement de système de chauffage existant ou, respectivement inexistant.

Dans la logique de développement de structure tissée ayant des propriétés multifonctionnelles, le projet de master recherche de Nocito [42] a permis d'identifier les technologies existantes de cellules photovoltaïques souples pouvant s'intégrer sur une toile à store de différente dimension. Hormis le choix de film flexible composé de silicium amorphe en tant que solution photovoltaïque souple, fiable et à rendement suffisant, la problématique de la connectique des cellules au textile a été abordée sur la base de multiples critères tels que: l'étanchéité du store final, la faible épaisseur du tissu support, l'efficacité énergétique et le prix total des composants.

Fort de ces premières analyses et essais, la thèse de doctorat de Nocito [43], s'est enchaînée sur le développement de solutions conçues pouvant être utilisées dans une logique de production autonome d'énergie électrique (camping-cars, bateaux) afin de favoriser une utilisation nomade ou des domaines connectés au réseau électrique (résidentiels) répondant ainsi à l'utilisation de l'énergie solaire dans les milieux urbains, tout en alliant esthétique et production d'électricité à l'échelle locale et déconcentrée.

Leurs poids, flexibilité et finesse confèrent aux produits développés des critères de performances intéressants comparativement à la surface déployée et à l'optimisation du volume de conditionnement du support textile de part la capacité d'enroulement du store sur lui-même.

Ce matériau textile composite possède plusieurs fonctions principales telles que la production d'énergie électrique, le confort thermique et la protection aux UVs.

La problématique majeure actuelle dans le domaine du transport est la réduction du poids des structures et plus particulièrement dans le domaine du véhicule associé au camping-car. Aussi la toile photovoltaïque répond parfaitement aux besoins de coupler une fonctionnalité de production d'énergie à l'allègement d'une structure existante.

Concernant l'habitat, les possibilités sont encore plus larges. Par exemple, dans le domaine de l'habitat souple (tente, abris...) la toile photovoltaïque permet une autonomie énergétique. Dans le cas de l'habitat rigide (maison, bâtiment...) on peut diminuer sa facture énergétique en revendant l'énergie produite aux fournisseurs d'électricité. La réalisation de prototypes a permis de montrer la pertinence de ce projet ainsi que sa faisabilité.

Le procédé d'assemblage de la connectique, des cellules photovoltaïques souples sur la structure tissée repose sur un procédé laminage semi-continue sans utiliser de machine sous-vide. La géométrie de la machine apporte de nombreux avantages : le contact plan entre le tapis et le cylindre chauffant, associé à un cylindre presseur, permet d'obtenir des niveaux d'adhérence cellules photovoltaïques-textiles importants.

Cette solution innovante a fait l'objet de 5 dépôts de brevet [44][45][46][47][48].

En raison du caractère confidentiel de ces recherches appliquées à des innovations industrielles, les actions de dissémination se sont limitées à une participation à une seule conférence [49].

Parallèlement au développement des textiles techniques, les travaux de recherche de la thèse de doctorat de Elfheri [50] ont porté sur le développement d'une méthode de commande permettant de contrôler en temps réel la pression répartie sur toutes les parties du corps humain en contact avec le support textile d'un lit d'hôpital tout en tenant compte des efforts, de la morphologie du patient et des données médicales (dermatologiques et générales) afin de diminuer la probabilité de formation d'escarres [51]. La convergence de la méthode de commande a été démontrée analytiquement afin d'assurer la stabilité du système et un compromis optimal entre l'efficacité médicale et le confort du patient. Un prototype de support médical utilisant la méthode développée et pouvant modifier sa morphologie a été réalisé [52].

L'ensemble de ces travaux scientifiques menés au cours de toutes ces années ont abouti à des innovations scientifiques essentiellement par le fruit de collaborations fondées sur des compétences multiples et complémentaires, aussi bien dans le domaine de la statistique et classification que dans la caractérisation des matériaux et de la commande prédictive.

## B. Innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines

L'ensemble de ces thématiques de recherche s'articule autour de 5 thèmes qui sont détaillés dans la partie scientifique de ce manuscrit. Le premier thème est relatif à l'observation et la caractérisation des tissus 3D interlocks chaines ; le deuxième thème s'attache aux propriétés et à la mise en forme des tissus 3D interlocks chaines ; le troisième thème décrit l'analyse et l'optimisation du procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines ; le quatrième thème est relatif au comportement à l'impact des structures textiles souples et le cinquième thème porte sur le comportement à l'impact des structures textiles composites.

L'objectif général du premier thème consiste à mieux comprendre la complexité de la géométrie d'une structure tissée 3D interlock chaîne par la définition précise de cette architecture tissée multi-couches et par la compréhension de l'influence des paramètres produits et procédé de fabrication sur la géométrie finale conduisant à des caractéristiques mécaniques différentes. Sur la base de cette définition, nous pouvons ensuite les distinguer selon des paramètres produits de la géométrie du tissu 3D interlock chaîne, que nous proposons d'enrichir par la prise en compte de paramètres de procédé de fabrication. Nous pouvons également mesurer l'influence des paramètres produits et procédé de fabrication sur la modification de géométrie des tissus 3D interlocks chaines. Puis, observer les trajectoires et les sections des fils de chaîne et trame au sein de la structure tissée multicouches par le biais d'images tomographiques. Enfin, nous pouvons identifier les paramètres produits et procédé de fabrication qui influent sur les caractéristiques mécaniques finales des tissus 3D interlocks chaines résinés et non résinés.

L'objectif général du deuxième thème consiste à identifier les avantages et inconvénients des tissus 3D interlocks chaines vis à vis de leurs paramètres produits et procédé de fabrication à l'aide de la littérature scientifique, complétée par nos travaux de recherche. A partir de cette connaissance, nous pouvons orienter la conception des produits, adapter nos procédés de fabrication et régler les paramètres de fabrication pour obtenir les propriétés mécaniques nécessaires aux contraintes et déformations lors d'une étape de pliage ou de mise en forme dans l'épaisseur de la structure tissée.

L'objectif général du troisième thème consiste à mieux comprendre le procédé de fabrication, notamment lors de la formation d'un tissu, afin de pouvoir l'optimiser à la production de tissu 3D interlock chaîne. L'observation de la cinématique réelle d'une machine à tisser de production, couplée à des mesures in-situ et en temps réel sur les fils, nous permet de mesurer l'influence de la dynamique des éléments de la machine à tisser en contact avec la matière. En tenant compte de ces observations, nous pouvons optimiser le procédé de fabrication adapté aux tissus 3D interlocks chaines.

L'objectif général du quatrième thème consiste à mieux comprendre le mode de comportement à l'impact des structures textiles et à identifier les paramètres produits qui influent sur la performance balistique de la solution de protection. Sur la base de cette connaissance, acquise par analyse des paramètres influents lors de simulations à l'impact d'un modèle de tissu ou par des expérimentations sur différentes configurations de structures textiles hybrides soumises également à l'impact, nous pouvons identifier des solutions de protection souple correspondant aux différents besoins d'utilisation et face aux diverses vitesses des différentes menaces.

L'objectif général du cinquième thème consiste à mieux comprendre le mode de comportement à l'impact des structures textiles composites et à identifier les paramètres produits qui influent sur la performance balistique de la solution de protection dure. Fort de cette connaissance, fondée sur des expérimentations sur des structures textiles composites soumises à l'impact, nous pouvons identifier des solutions de protection dure adaptées aux différents besoins d'utilisation pour les diverses vitesses des différentes menaces.

## IV. Bilan général de la valorisation scientifique

L'ensemble de ces activités de recherche de ces différents thèmes a conduit à l'encadrement direct de :

- **11** thèses (9 soutenues [43][50][53][54][55][56][57][58][59] et 2 en cours [60][61]),
- **49** projets de fin d'études (ingénieur/master), dont 27 en lien direct avec les travaux de recherche [29][30][31][40][41][42][62][63][64][65][66][67][68][69][70][71][72][73][74][75][76][77][78][79][80][81][82]

Cela a permis la publication de :

- **11** (OS) chapitres d'ouvrages scientifiques,
- **24** (ACL) articles dans des revues nationales et internationales avec comité de lecture répertoriées dans les bases de données internationales,
- **8** (ACLN) articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture non répertoriées dans les bases de données internationales,
- **7** rapports internes [83][84][85][86][87][88][89].

A la présentation :

- des résultats lors de **4** (INV) conférences données à l'invitation du comité d'organisation invités,
- de **127** (ACT) communications avec actes dans des conférences nationales et internationales

Au dépôt de **6** (BV) brevets et à la présentation :

- de **11** (AFF) communications par affiche dans un congrès international ou national
- de **10** (COM) communications orales sans actes dans un congrès international ou national

Tableau 37. Bilan de la valorisation scientifique sur l'ensemble de la carrière universitaire

Total	Détail	Types de valorisation scientifique
11	<p><b>1</b></p> <p><b>3</b></p> <p><b>7</b></p>	<p><b>OS : Ouvrages scientifiques (ou chapitres de ces ouvrages)</b></p> <p>Travaux de recherche en relation directe avec les thèmes de ma thèse de doctorat : [25]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications des tissus 3D interlocks chaines : [35][39][90]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines : [91][92][93][94][95][96][97]</p>
24	<p><b>5</b></p> <p><b>19</b></p>	<p><b>ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées dans les bases de données internationales</b></p> <p>Travaux de recherche en relation directe avec les thèmes de ma thèse de doctorat : [4][6][15][19][21]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines : [98][99][100][101][102][103][104][105][106][107][108][109][110][111][112][113][114][115][116]</p>
8	<p><b>3</b></p> <p><b>5</b></p>	<p><b>ACLN : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture non répertoriées dans les bases de données internationales</b></p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications des tissus 3D interlocks chaines : [33][117][118]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines : [119][120][121][122][123]</p>
4	<p><b>1</b></p> <p><b>3</b></p>	<p><b>INV : Conférences données à l'invitation du comité d'organisation dans un congrès international ou national</b></p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications des tissus 3D interlocks chaines : [38]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines : [124][125][126]</p>
127	<p><b>22</b></p> <p><b>6</b></p> <p><b>99</b></p>	<p><b>ACT : Communications avec actes dans un congrès international ou national</b></p> <p>Travaux de recherche en relation directe avec les thèmes de ma thèse de doctorat : [3][5][7][8][9][10][11][12][13][14][16][17][18][20][22][24][26][27][28][127][128][129]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications des tissus 3D interlocks chaines : [32][37][51][52][130][131]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines : [132][133][134][135][136][137][138][139][140][141][142][143][144][145][146][147][148][149][150][151][152][153][154][155][156][157][158][159][160][161][162][163][164][165][166][167][168][169][170][171][172][173][174][175][176][177][178][179][180][181][182][183][184][185][186][187][188][189][190][191][192][193][194][195][196][197][198][199][200][201][202][203][204][205][206][207][208][209][210][211][212][213][214][215][216][217][218][219][220][221][222][223][224][225][226][227][228][229][230]</p>
6	<p><b>3</b></p> <p><b>3</b></p>	<p><b>VB : Valorisation et brevets</b></p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications des tissus 3D interlocks chaines : [46][47][48]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines : [231][232][233]</p>
11	<p><b>1</b></p> <p><b>10</b></p>	<p><b>AFF : Communications par affiche dans un congrès international ou national</b></p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications des tissus 3D interlocks chaines : [34]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines : [234][235][236][237][238][239][240][241][242][243]</p>
10	<p><b>3</b></p> <p><b>2</b></p> <p><b>5</b></p>	<p><b>COM : Communications orales sans actes dans un congrès international ou national</b></p> <p>Travaux de recherche en relation directe avec les thèmes de ma thèse de doctorat : [244][245][246]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication hors applications des tissus 3D interlocks chaines : [36][49]</p> <p>Travaux de recherche effectués sur les innovations de produit et de procédé de fabrication relatives aux tissus 3D interlocks chaines : [247][248][249][250][251]</p>

## V. Bibliographie

### OS : Ouvrages scientifiques (ou chapitres de ces ouvrages)

- [25] F. Boussu and JJ. Denimal, *Statistical Data Mining & Knowledge Discovery, Chapter 16, Statistical Modeling and Data Mining to identify the consumer preferences*, Chapman and Hall/CRC ed., H. Bozdogan, Ed. USA, July 29, 2003.
- [35] F. Boussu and JL. Petitniot, Intelligent textiles and clothing, chapter 8, Shape memory materials, Development of Shape Memory Alloy Fabrics for Composite Structures, Woodhead Publishing ed., H. Mattila, Ed., 2005, vol. 2.
- [39] F. Boussu, C. Cochrane, M. Lewandowski, and V. Koncar, Chapter 8, Smart textiles in automotive interiors, Woodhead publishing ed., October 2008.
- [90] F. Boussu, G. Bailleul, J.L. Petitniot, and H. Vinchon, "Development of shape memory alloy fabrics for composite structures," ONERA, Lille, France, Document d'accompagnement de publication DMSE0202 TP 2002-51, 2002.
- [91] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "Piezoresistive fibrous sensor for on line structural health monitoring of composites," in *Smart Sensors for Industrial applications*, CRC Press, Ed., 2013, vol. Part V Piezoresistive, wireless and electrical sensors, ch. 27, pp. 455-469.
- [92] V. Koncar and F. Boussu, "Flexible Displays on Textiles for Personal Protection," in *Intelligent Textiles for Personal Protection and Safety NATO security through science series. D: information and communication security*, S. Jarayaman, P. Kiekens, and A.M. Grancaric, Eds.: IOS press, 2006, vol. 3, pp. 65-88.
- [93] F. Boussu and P. Bruniaux, "Customization of a lightweight bullet proof vest for the female form," in *Advances in military textiles and personal equipment*.: Woodhead Publishing, 2012, ch. Part II, pp. 167-195.
- [94] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "Intelligent textiles for armoured vehicles," in *Smart Textiles for protection*, R. Chapman, Ed.: Woodhead Publishing, 2010.
- [95] V. Koncar, C. Cochrane, M. Lewandowski, F. Boussu, and C. Dufour, "Electro-conductive sensors and heating elements based on conductive polymer composites," *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 21, no. 2/3, pp. 82 - 92, 2009.
- [96] C. Dufour, P. Wang, F. Boussu, and D. Soulat, "Three-dimensional textiles in the automotive industry," in *Advances in 3D Textiles*, X. Chen, Ed.: Woodhead Publishing, 2014, ch. 10.
- [97] F. Boussu, C. Dufour, F. Veyet, and M. Lefebvre, "Weaving processes for composites manufacture," in *Advances in Composites Manufacturing and Processes - Part I*.: Woodhead Publishing, 2014, ch. 4.

### ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées dans les bases de données internationales

- [4] F. Boussu, A. Lefort, M. Happiette, B. Rabenasolo, and P. Yim, "Modelling and simulation of the Textile Channel by HyperNets," *Journal of the Textile Institute*, vol. 88 Part 2, no. 2, pp. 146-157, 1997.
- [6] F. Boussu, B. Rabenasolo, M. Happiette, and C. Vasseur, "Simulation de la filière Textile," *RAIRO-APII-JESA*, vol. 31, no. 4, pp. 741-768, Juin 1997.
- [15] F. Boussu and JJ. Denimal, "Estimation dynamique des comportements de vente d'articles textiles," *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, vol. 36, no. 2, pp. 223-244, 2002.
- [19] F. Boussu and JJ. Denimal, "Identification of Textile sales behaviour for a better estimation," *The Journal of the Textile Institute*, vol. 91 part 2, no. 2, pp. 114 – 126, 2000.
- [21] F. Boussu and JJ. Denimal, "L'explication des comportements de vente des articles textiles par une méthode de data-mining," *Revue Française de Gestion Industrielle*, vol. 20, no. 4, pp. 71 – 82, 2001.
- [98] S. Nauman, I. Cristian, and F. Boussu, "Geometrical Modelling of Angle Warp Interlock Fabrics," *Journal of Textile Institute*, vol. 103, no. 7, pp. 766-776, 2012.
- [99] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, and F. Boussu, "Homogenization of the elastic behaviour of a layer-to-layer angle-interlock composite," *Composite Structures*, vol. 93, no. 11, pp. 2795-2807, 2011.
- [100] I. Cristian, S. Nauman, F. Boussu, and V. Koncar, "A study of strength transfer from tow to textile composite using different reinforcement architectures," *Applied Composite Materials*, vol. 19, no. 3-4, pp. 427-442, 2012.
- [101] S. Nauman, P. Lapeyronnie, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "On line measurement of structural deformations in composites," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1329 – 1336, June 2011.
- [102] X. Legrand et al., "Forming Behaviour of Warp Interlock Composite," *International Journal of Material Forming*, vol. 2, no. 1, pp. 177-180, August 2009.
- [103] C. Dufour, P. Wang, F. Boussu, and D. Soulat, "Experimental investigation about stamping behaviour of 3D warp interlock composite performs," *Applied Composite Material*, 2013.
- [104] F. Boussu, "The use of warp interlock fabric inside textile composite protection against ballistic impact," *Textile Research Journal*, vol. 81, no. 4, pp. 344-354, March 2011, DOI: 10.1177/0040517510385170.
- [105] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Kinematic Modelling of the Weaving Process applied to 2D fabric," *Journal of Industrial Textiles*, published online 25 April 2014.
- [106] N. Trifigny et al., "PEDOT:PSS-Based Piezo-Resistive Sensors Applied to Reinforcement Glass Fibres for in Situ Measurement during the Composite Material Weaving Process," *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 10749-10764, 2013.
- [107] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Numerical modelling of the weaving process for textile composite," *Key Engineering Materials*, vol. 554-557, pp. 472-477, 2013.
- [108] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Influence of high-performance yarns degradation inside three-dimensional warp interlock fabric," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 42, no. 4, pp. 475–488, April 2013.
- [109] C. Ha-Minh, T. Kanit, F. Boussu, and A. Imad, "Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact," *Computational Materials Science*, vol. 50, pp. 2172-2184, 2011.

- [110] C. Ha-Minh, F. Boussu, A. Imad, T. Kanit, and D. Crepin, "Ha-Minh C., Boussu F., Imad A., Kanit T., Crepin D., Multi-scale model to predict the ballistic impact behavior of multi-layer plain woven fabrics," *International Journal of Computational Methods*, vol. 11, no. 3, pp. 1343011 -1 to12, 2014.
- [111] C. Ha-Minh, A. Imad, T. Kanit, and F. Boussu, "Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric," *International Journal of Mechanical Sciences*, 29 January 2013.
- [112] C. Ha-Minh, A. Imad, F. Boussu, T. Kanit, and D. Crepin, "On analytical modelling to predict the ballistic impact behaviour of textile multi-layer woven fabric," *Composite Structure*, 2012.
- [113] C. Ha-Minh, A. Imad, F. Boussu, T. Kanit, and D. Crepin, "Numerical study on the effects of yarn mechanical transverse properties on the ballistic impact behavior of textile fabric," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 47, no. 7, pp. 524 - 534, 2012.
- [114] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Effect of Frictions on the Ballistic Performance of a 3D Warp Interlock Fabric: Numerical Analysis," *Applied Composite Materials*, vol. 19, no. 3-4, pp. 333-347, June 2012.
- [115] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Analysis on failure mechanisms of an interlock woven fabric under ballistic impact," *Engineering Failure Analysis Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 2179-2187, December 2011.
- [116] B. Provost et al., "Armouring solutions against high velocity impact using 2D laminates and 3D warp interlock composites," *Journal of Industrial Textile*, vol. 43, no. 4, Apr 1, 2014.

#### **ACLN : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture non répertoriées dans les bases de données internationales**

- [33] F. Boussu, G. Bailleul, J.L. Petitniot, and H. Vinchon, "Development of Shape Memory Alloy fabrics for composite structures," *Autex Research Journal*, vol. 2, no. 1, March 2002.
- [117] J. Louwagie and F. Boussu, "TRITEX: Transfer of research and innovations in textiles," *Unitex*, vol. 3, p. 51, 2009.
- [118] X. Legrand, F. Boussu, P. Blot, and D. Guittard, "A new technique of weaving 3D surface application to carbon/epoxy corner fitting plies," *International Journal of Material Forming*, vol. 2, no. Supplement 1, pp. 185-187, August 2009.
- [119] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, and F. Boussu, "Angle-interlock reinforcements: Weaving and the mechanical properties of composites," *JEC Composites*, no. 58, pp. 58-59, 2010.
- [120] J. Maillet, M. Lefebvre, F. Boussu, and M. Pirlot, "Innovative 3D textile structure for soft body armor protection, EPIDARM project," in *Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC Protection*. Split, Croatia: ASI NATO, August 31, 2011, p. 350.
- [121] F. Boussu, F. Veyet, and M. Lefebvre, "Recent advances in textile composite for impact protection," *World Journal of Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 53-66, 2010.
- [122] F. Boussu, V. Begus, X. Flambard, and X. Legrand, "Une nouvelle solution textile pour le renforcement des structures composites utilisées en protection balistique - Application au blindage de véhicule terrestre et aéroporté," *Textile à Usage techniques*, no. 65, pp. 24 - 26, Septembre 2007.
- [123] P. Bruniaux, I. Cristian, and F. Boussu, "State of the art and new perspective on ballistic vest design," *Buletinul Institutului politehnic din Iasi (Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi)*, vol. Tomul LVII (LXI), no. 3, pp. 57-65, 2011.

#### **INV : Conférences données à l'invitation du comité d'organisation dans un congrès international ou national**

- [38] F. Boussu, "Shape Memory alloys used in fabrics for Car seats," in *NEST invited conference, Smart and intelligent Car Interior materials, FOCUS: The Car interior of the Future*, Gothenburg, Sweden, 22 and 23 February 2007.
- [124] F. Boussu and J. Maillet, "Innovative 3D textile structure for soft body armour protection," in *NATO Advanced Study Institute "Defence Related Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC (Nuclear, Biological, Chemical) Protection*, Split, Croatia, Tuesday 6th April to Friday 16th April 2010.
- [125] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, P. Krawczak, and F. Boussu, "Experimental study and modeling of the mechanical behaviour of angle-interlock composites," in *Congrès International Carrosserie et Plastique 2010, "Composites et Polymère Polymères à Haut Module"*, Douai, France, 9-10 juin 2010.
- [126] B. Provost and F. Boussu, "Textile Composite: Solution for new protections," in *CCG Seminar effectiveness on body armor*, Carl-Cranz-Gesellschaft e.V. Gesellschaft für technisch-wissenschaftliche Weiterbildung, Saint Louis, France, 03/12/2012.

#### **ACT : Communications avec actes dans un congrès international ou national**

- [3] F. Boussu, M. Happiette, B. Rabenasolo, F. Godart, and C. Vasseur, "Modélisation et simulation de la filière Textile/Habillement/Distribution," in *2ème congrès maghrébin de génie électrique, CMGE'95*, Tunis, Tunisie, 16-17 septembre 1995.
- [5] F. Boussu, M. Happiette, A. Lefort, B. Rabenasolo, and P. Yim, "Modélisation et simulation de la filière textile par hypernets," in *5th International Conference on CIMAT'96 , Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology*, Grenoble, France, May 29-31 1996, pp. 375 - 380.
- [7] F. Boussu, P. Vroman, M. Happiette, B. Rabenasolo, and C. Vasseur, "Amélioration des performances de la filière Textile par la simulation et la prévision des ventes," in *Congrès ITAA (International Textile and Apparel Association)*, Lyon, France, 10-12 juillet 1997.
- [8] M. Happiette, F. Boussu, B. Rabenasolo, and X. Zeng, "L'approche de la classification dans les problèmes de prévision de ventes. Application à la filière Textile/Habillement/Distribution," in *5th International Conference on CIMAT'96 , Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology*, Grenoble, France, May 29-31 1996, pp. 402-407.
- [9] F. Boussu, M. Happiette, and B. Rabenasolo, "Textile stock optimization by sales forecasting," in *Workshop on production, planning and control*, Mons, Belgium, 9-11 September 1996.
- [10] F. Boussu, M. Happiette, and B. Rabenasolo, "Sales partition for forecasting into textile distribution network," in *IEEE/SMC International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 4, Beijing, China, October 14-17 ,1996, pp. 2868-2873.
- [11] B. Rabenasolo, M. Happiette, and F. Boussu, "Sales Forecasting under uncertain environment. Fuzzy classification in Textile Distribution," in *IFAC-CIS 97 Workshop*, vol. 3, Belfort, France, May 20-22 1997, pp. 478-483.



- [12] M. Happiette, F. Boussu, B. Rabenasolo, and X. Zeng, "Clustering of symbolic objects : Decision aid for production planning," in *4TH IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Seoul, Korea, July 21-23 1997, pp. 341-346.
- [13] F. Boussu, B. Rabenasolo, M. Happiette, and C. Vasseur, "Determination of seasonality by a window clustering method," in *IEEE/SMC, CESA'98 IMACS, International Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*, vol. 3, Hammamet, Tunis, April 1-4 1998, pp. 350-353.
- [14] F. Boussu, JJ. Denimal, and OW. Diallo, "Estimation of textile sales behaviour," in *IMACS/IEEE CSCC'99 International Multiconference*, Athens, Greece, 4-8 Juillet 1999.
- [16] F. Boussu and JJ. Denimal, "The PLS Regression : a logistic tool to the textile sales estimation," in *Troisièmes Rencontres Internationales de Recherche en Logistique RIRL2000*, Trois Rivières, Canada, 09 au 11 mai 2000.
- [17] F. Boussu, JJ. Denimal, and OW. Diallo, "The PLS Regression : A Response to the Textile sales estimation," in *WAC / ISIAC 2000, Fourth biannual World Automation Congress*, Hawaiï, USA, June 11-16 2000.
- [18] F. Boussu and JJ. Denimal, "Contribution to the logistic of a textile firm," in *IFAC, IFIP, IEEE Second Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'2000)*, Grenoble, France, 5-8 July 2000.
- [20] F. Boussu and JJ. Denimal, "Building a new garment collection by a multi criteria decision aid tool," in *12th MINI EURO Conference*, Brussels, Belgium, April 2-5, 2002, p. 82.
- [22] F. Boussu and JJ. Denimal, "Hierarchical Classification of Linear Models coming from a PLS Regression. Application to Textile Sale Data Mining," in *Integrating Data Mining and Knowledge Management (ICDM 01)*, San Jose, USA, November 29 - December 2, 2001.
- [24] F. Boussu and JJ. Denimal, "Statistical Modeling and Data mining to identify the consumer Preferences. Application to a Textile sales data set," in *C. Warren Neel Conference on the New Frontiers of Statistical Data Mining and Knowledge Discovery*, Knoxville, Tennessee, USA, June 22-25 2002, p. 30.
- [26] F. Boussu and JJ. Denimal, "Data visualization tools to highlight sales and products relationships. Application of a data mining method to textile sales," , vol. II, Las Vegas, Nevada, USA, June 23-26, 2003, pp. 475-481.
- [27] F. Boussu, JJ. Denimal, and OW. Diallo, "Reduction of the estimation uncertainty of the textile sales profiles by using a data-mining technique," in *IPMU 2002 Special session on Information Processing and Management of Uncertainty in Textile/Garment Industry*, vol. 3, Annecy, France, July 1-5, 2002 , pp. 1895-1900.
- [28] F. Boussu and JJ. Denimal, "Application of a Data Mining method on textile sales to identify the consumer preferences," in *Multi-conference on "Computational Engineering in Systems Applications" (CESA2003) - technical session on Computational Engineering in Textile Applications*, Lille, France, July 9-11, 2003.
- [32] F. Boussu, JL. Petitniot, G. Bailleul, and H. Vinchon, "The Interesting Properties of Shape Memory Alloy to Use in Technical Textiles," in *1st AUTEX Conference, Technical Textiles : Designing Textiles for Technical Applications*, Guimaraes, Portugal, 27-28 june, 2001.
- [37] V. Koncar, F. Boussu, C. Cochrane, and M. Lewandowski, "Some applications of smart textile used in the future automotive interior," in *2nd International Workshop Design – Innovation – Development*, Iasi, Romania, 31th of August to 3rd of September 2007, pp. 38-50.
- [51] J. Elfheri, F. Boussu, and V. Koncar, "Modelling and simulation of an active anti-ulcer mattress system," in *6th International industrial simulation conference 2008, ISC'2008*, Lyon, France, From 09 to 11 June 2008.
- [52] J. Elfheri, F. Boussu, V. Koncar, and C. Vasseur, "Novel approach of ulcer prevention based on pressure distribution control algorithm," in *IEEE ICMA 2011, International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, China, August 7 – 10, 2011.
- [127] M. Happiette, F. Boussu, B. Rabenasolo, F. Godart, and C. Vasseur, "Conception of integrated systems logistic into textile distribution network," in *12th Int. Conf. on Systems Science*, Wroclaw, Poland, 12-15 September 1995.
- [128] M. Happiette, F. Boussu, P. Vroman, B. Rabenasolo, and C. Vasseur, "Optimization of informational treatment. A response to economical strategy of the textile channel," in *11th Romanian Conference of Textiles and Leathership*, Iasi, Romania, October 23-24 1997.
- [129] F. Boussu and J.J. Denimal, "The data-mining : a competitive advantage to the textile firms," in *World Textile Conference - 2nd AUTEX Conference, Textile Engineering at the dawn of a new millennium: an exciting challenge*, Bruges, Belgium, 1-3 July 2002, p. 589.
- [130] X. Legrand, J. Bardy, and F. Boussu, "Fibre steered by GA and specific experimental device," in *SENDA 08*, Monastir, Tunisie, Du 08 au 10/05/2008.
- [131] X. Legrand, J. Bardy, and F. Boussu, "Fibre steered by GA and specific experimental device," in *SAMPE 08*, vol. 53, Long Beach, CA, USA, May 18-22, 2008.
- [132] F. Boussu, X. Legrand, and A. Serret, "A general clustering of warp interlock structures," *1st Intelligent Textiles and Mass Customisation (ITMC 2007)*, pp. 83 -90, 2007.
- [133] F. Boussu, X. Legrand, and C. Binetruy, "General definition of warp interlock structures," in *TexComp 9, the 9th Annual International Conference on Textile Composites*, University of Delaware, Newark, Delaware, October 13 – 15, 2008, pp. 399-408.
- [134] F. Boussu, X. Legrand, S. Nauman, and V. Koncar, "Geometric modelling of 3D angle interlock fabrics," in *Autex 08, World Textile Conference*, Biella, Italie, June 24-26, 2008.
- [135] S. Nauman, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Geometrical modelling of 3D textile composite application to warp interlock carbon fabrics," in *13th European Conference on Composite Materials*, Stockholm, Sweden, June 2 - 5, 2008.
- [136] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Weaving of 3D interlock layer to layer carbon-glass reinforcement on a conventional loom," in *2nd international Conference on textile and Clothing*, Lahore, Pakistan, 4-5 March 2009.
- [137] S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, X. Legrand, and V. Koncar, "Application of 3D geometrical modelling approach on multilayer angle interlock carbon reinforcements," in *10th World Textile Conference*, Vilnius, Lithuania, 21-23 June, 2010.
- [138] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Geometrical characterization of orthogonal / layer-layer woven interlock carbon reinforcement," in *AUTEX 2009 World Textile Conference*, İzmir, Turkey, May, 26-29, 2009, pp. 682-691.
- [139] S. Nauman, F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Geometrical characterization of 3D angle interlock fabrics," in *17th International*

Conference on Composite Materials, Edinburgh, UK, 27-31 July 2009.

- [140] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, P. Krawczak, and F. Boussu, "Homogenization of the mechanical behavior of a layer-to-layer angle-interlock composite," in SAMPE Europe 30th International Jubilee Conference and Forum, Paris, France, 23-25 March 2009, pp. 224-230.
- [141] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, P. Krawczak, and F. Boussu, "Homogenization of the mechanical behavior of a layer-to-layer angle-interlock composite," in 17th International Conference on Composite Materials, Edinburgh, UK, 27-31 July 2009.
- [142] P. Lapeyronnie, P. Le Grogne, C. Binetruy, and F. Boussu, "Homogenization of the mechanical behavior of a layer-to-layer angle-interlock composite," in 10th International Conference on Textile Composites, Lille, France, October 26–28, 2010, pp. 20-27.
- [143] F. Boussu and X. Legrand, "Technical and Economical performances of 3D Warp Interlock Structures," in SAMPE 08, vol. 53, Long Beach, CA, USA, May 18-22, 2008.
- [144] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, D. Soulat, and X. Legrand, "Analyse du comportement de renforts tissés interlock lors du procédé de préformage," in 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France, du 26 au 30 août 2013.
- [145] F. Boussu, I. Cristian, and S. Nauman, "Technical performance of yarns inside a 3D woven fabric," in ITC International Conference on Latest Advancements in High Tech Textiles and Textile-based Materials, Gent, Belgium, 23-25 September 2009, pp. 142-149.
- [146] F. Boussu, I. Cristian, S. Nauman, P. Lapeyronnie, and C. Binetruy, "Effect of 3D-weave architecture on strength transfer from tow to textile composite," in 2nd World conference on 3D Fabrics and their applications, Greenville, South Carolina, USA, 6-7 avril 2009.
- [147] I. Cristian, F. Boussu, and S. Nauman, "Interesting parameters of 3D warp interlock fabrics influencing the mechanical properties of the final composite structures," in 10th World Textile Conference, Vilnius, Lithuania, 21-23 June, 2010.
- [148] S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, and V. Koncar, "Impact of 3D woven structure onto the high performance yarn properties," in Second Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation, Textile Composites Workshop, Casablanca, Morocco, November 2009 the 12 – 14th.
- [149] S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, and V. Koncar, "Design and Optimization of piezoresistive sensors for Structural health monitoring of carbon fiber reinforced 3D woven composites," in 7th International Bhurban conference on applied sciences and technology, Islamabad, Pakistan, 11-14 January 2010.
- [150] S. Nauman, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "In situ strain sensing in Three dimensional woven preform based composites using flexible tensile sensor," in 10th TEXCOMP International Conference on Textile Composites, Lille, France, October 26–28, 2010, pp. 363-370.
- [151] F. Boussu, X. Legrand, S. Nauman, and C. Binetruy, "Mouldability of angle interlock fabric," in FCPM 9, 9th international Conference on Flow Processes in Composite Materials, Montréal, Canada, 8–10 July 2008, p. 42.
- [152] X. Legrand et al., "Forming behaviour of warp interlock composite," in ESAFORM Conference, Twente University, Netherlands, 27 to 29th April 2009.
- [153] Y. Nawab, S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, and V. Koncar, "Study of Mouldability of 3D Woven Multilayer Interlock reinforced Carbon-Epoxy Composites," in 7th International Bhurban conference on applied sciences and technology, Islamabad, Pakistan, 11-14 January 2010.
- [154] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, and D. Soulat, "Stamping behaviour of 3D warp interlock fabrics," in 13th AUTEX World Textile Conference, Dresden, Germany, May 22nd to 24th 2013.
- [155] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, and D. Soulat, "Experimental Analysis of the warp interlock deformability during the stamping process," in TEXCOMP 11 Conference, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [156] N. Trifigny et al., "PEDOT:PSS based sensors for in-situ measurement during the composite material weaving process," in 13th AUTEX World Textile Conference, Dresden, Germany, May 22nd to 24th 2013.
- [157] N. Trifigny et al., "New PEDOT: PSS: NMP /PVA yarn sensors for in measurements of glass fiber 3d interlock fabric during the weaving process," in 4th ITMC International Conference, Lille, France, 8-10 Octobre 2013.
- [158] N. Trifigny, F. Boussu, V. Koncar, and D. Soulat, "Dynamic in-situ measurements of 3D Composite material mechanical constraints during the weaving process," in 12th AUTEX world textile conference, vol. 2, Zadar, Croatia, 13 to 15th June 2012, pp. 1475-1480.
- [159] N. Trifigny, F. Boussu, and V. Koncar, "Dynamic in-situ measurements of 3D composite material mechanical constraints during the weaving process," in 4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion, Bangkok, Thailand, 3-4 July 2012.
- [160] N. Trifigny, F. Boussu, D. Soulat, and V. Koncar, "Dynamic in-situ measurements of 3D composite material mechanical constraints during the weaving process," in 4th World conference on 3D fabrics and their applications, Aachen, Germany, September 10th – 12th, 2012.
- [161] N. Trifigny et al., "In-Situ measurements of strain and stress on Glass warp yarn during the weaving of 3d interlock structure with innovative sensors," in TEXCOMP 11 Conference, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [162] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, and P. Boisse, "Influence of weaving process on the 3D woven fabric for composite materials," in 12th AUTEX world textile conference, vol. 2, Zadar, Croatia, 13 to 15th June 2012, pp. 1785-1790.
- [163] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, and P. Boisse, "Numeric Modelling of the weaving process for Textile composite," in 4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion, Bangkok, Thailand, 3-4 July 2012.
- [164] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, and P. Boisse, "Numerical modelling and simulation of the weaving process for textile composite applications," in 4th World conference on 3D fabrics and their applications, Aachen, Germany, September 10th – 12th, 2012.
- [165] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Numerical modelling of the weaving process for textile composite," in ESAFORM, Aveiro, Portugal, 22 to 24 April 2013.
- [166] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," in JNC 18, Nantes, France, du 12 au 14 juin 2013.
- [167] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Numeric simulation tool of the weaving process," in International conference Modelling simulation and visualization methods, MSV13, Las Vegas, USA, 22 to 25 July 2013, pp. 60-63.
- [168] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Numerical approach of the weaving process for textile composite," in ICCM 19 - 19th International Conference on composite materials, Montreal, Canada, 28 July to 2 August 2013.
- [169] F. Veyet et al., "Optimized weaving process fitted to 100% carbon nano-tube multi-filaments yarns," in 12th AUTEX world textile

- conference, Zadar, Croatia, 13 to 15th June 2012, pp. 349-354.
- [170] F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Measurement of high performance yarns properties inside fabrics," in 2<sup>ème</sup> congrés international de la recherche appliquée en Textile (CIRAT2), Monastir, Tunisie, 30 novembre – 2 décembre 2006.
  - [171] F. Boussu, X. Legrand, S. Nauman, and P. Bruniaux, "Comparison of the geometrical and mechanical models used for the textile composite structures," in International conference CORTEP, vol. 1, Iasi, Romania, 18 au 21 octobre 2007, pp. 21 – 30.
  - [172] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Degradation measurement of fibrous reinforcement inside composite material," in ICCE-19: 19th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering, Shanghai, China, July 24-30, 2011.
  - [173] J. Nussbaum, N. Faderl, R. Nusing, C. Ha-Minh, and F. Boussu, "Development of a new method to determine tensile strength of ballistic yarns," in DYMAT 2012, 10th International Conference on Mechanical and Physical Behaviour under Dynamic Loading, 2012.
  - [174] C. Chevalier, A. Klavzar, C. Kerisit, D. Coutellier, and F. Boussu, "Development of a new device for experimental study of the dynamic behaviour of ballistic yarns," in TEXCOMP 11, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
  - [175] C. Chevalier et al., "Dynamic mechanical behaviour of yarn under high speed loading," in 14th AUTEX conference, Bursa, Turkey, 26 to 28 May 2014.
  - [176] B. Provost, F. Boussu, J. Nussbaum, and M. Lefebvre, "Use of new warp interlock structures against high velocity impact," in Personal Armour Systems Symposium, Québec, Canada, September, 2010.
  - [177] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Behaviour of a warp interlock fabric subjected to ballistic impact: experimental analysis," in 12th AUTEX world textile conference, vol. Book 1, section C, Zadar, Croatia, 13 to 15th June 2012, pp. 525-530.
  - [178] J. Van Roey et al., "Continuous measurement of the projectile velocity during ballistic impact in flexible body armour," in 10th International Conference on Textile Composites, Lille, France, October 26–28, 2010, pp. 299-305.
  - [179] C. Ha-Minh, F. Boussu, A. Imad, T. Kanit, and D. Crepin, "Multi-scale model to predict the ballistic behaviour of multi-layer plain woven fabrics," in International conference on advances in computational mechanics (ACOME), Ho Chi Minh City, Vietnam, August 14-16, 2012.
  - [180] C. Ha-Minh, F. Boussu, and A. Imad, "Experimental and Numerical Investigation of a 3D Fabric Subjected to Ballistic Impact," in 4th World conference on 3D fabrics and their applications, Aachen, Germany, September 10–12th, 2012.
  - [181] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Effects of the mechanical transverse properties of bundles on the ballistic impact onto textile fabric: numerical modelling," in 19th DYMAT Technical Meeting, Strasbourg, France, 02 December 2010.
  - [182] C. Ha-Minh, F. Boussu, D. Crepin, T. Kanit, and A. Imad, "Dependence of dynamic behavior of 2D fabric on yarns mechanical transverse properties," in SAMPE Tech 2012, Damage I Room 4, Charleston Convention center, North Charleston, SC, USA, October 22-25 2012.
  - [183] C. Ha-Minh, F. Boussu, T. Kanit, D. Crepin, and A. Imad, "Effect of friction on ballistic impact of a 3D interlock woven fabric: numerical analysis," in 26th International Symposium on Ballistics, Miami, USA, 12 to 16 September 2011.
  - [184] C. Ha-Minh, B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, and A. Imad, "Vers la géométrie réelle d'un tissu 3D interlock sur la précision de la simulation numérique à l'impact," in CSMA 2013, 11<sup>ème</sup> Colloque National en Calcul des Structures, Ghien, France, du 13 au 17 Mai 2013.
  - [185] M. Lequin, E. Ferry, B. Provost, D. Coutellier, and F. Boussu, "Validation of a new numerical weaving tool highlighting the influence of real yarn positions and shapes on their behaviour under impact," in 13th AUTEX World Textile Conference, Dresden, Germany, May 22nd to 24th 2013.
  - [186] C. Chevalier, F. Boussu, and J. Nussbaum, "3D warp interlock fabric as an efficient flexible solution for impact protection," in LWAG 2012 Lugano Workshop, Opportunities and Challenges of Light-Weight Armour- Failure Mechanisms, Materials, Experiments and Modeling, Lugano, Switzerland, October 25-26, 2012.
  - [187] C. Ha-Minh et al., "Experimental investigations of the impact behavior of a warp interlock fabric," in ICCE-19: 19th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering, Shanghai, China, July 24-30, 2011.
  - [188] F. Boussu et al., "High Capacity of Energy Absorption Impact of Multi Layer Structures Application to Aramid Warp Interlock Fabric," in AUTEX 2009 World Textile Conference, İzmir, Turkey, May, 26-29, 2009, pp. 692-698.
  - [189] F. Boussu, M. Lefebvre, X. Legrand, and V. Koncar, "Efficiency of 3D-warp interlock fabrics to high speed impact," in 6th International Conference, Scientific Session II Technical Textiles, Cairo, Egypt, April 5 – 7th, 2009.
  - [190] M. Lefebvre and F. Boussu, "Behaviour of warp interlock structure under a high velocity steel ball impact," in Second Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation, Textile Composites Workshop, Casablanca, Morocco, November 2009 the 12 – 14th.
  - [191] M. Lefebvre and F. Boussu, "High Energy absorption of Warp Interlock Fabrics: Application to high speed impact of fragments," in DYMAT 2009, 9th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, Brussels, Belgium, 7 – 11 September 2009.
  - [192] P. Bruniaux, I. Cristian, and F. Boussu, "State of the art and new perspective on ballistic vest design," in Technical Textiles – Present and Future Symposium, Iasi, Romania, 21-22 October 2011.
  - [193] A. Cichocka, M. Kulinska, P. Bruniaux, and F. Boussu, "Ballistic Body Armor Project for Women," in AUTEX 2009 World Textile Conference, İzmir, Turkey, May 26-29, 2009, pp. 773-778.
  - [194] J. Maillet, M. Kulinska, A. Cichocka, P. Bruniaux, and F. Boussu, "A ballistic vest for women," in LWAG 2009 Conference, Security and use of innovative technologies against terrorism, Aveiro, Portugal, May 18-19, 2009.
  - [195] F. Boussu, A. Ragot, M. Kulinska, X. Legrand, and P. Bruniaux, "Customization of a lightweight ballistic vest," in Futurotextiel 08, 2nd International scientific conference "Textiles of the Future", Kortrijk, Belgium, 13 – 15 november 2008.
  - [196] F. Boussu and X. Legrand, "Interesting properties of 3D Warp interlock structures to delamination and impact resistance," in SEICO 08, SAMPE EUROPE International Conference and Forum, Paris, France, March 31st. – April 2nd, 2008, pp. 297-302.
  - [197] J. Pariente, F. Boussu, and F. Veyet, "New 3D Textile Composite Protection against Armour Piercing Ammunitions," in 4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion, Bangkok, Thailand, 3-4 July 2012.
  - [198] F. Boussu, V. Begus, X. Flambard, and X. Legrand, "A new textile solution for ballistic protection applied to aircraft and land armour

- plated vehicles," in 2nd International Workshop Design – Innovation – Development, Iasi, Romania, 31th of August to 3rd of September 2007, pp. 30-38.
- [199] F. Boussu, V. Begus, X. Flambard, and X. Legrand, "A new textile solution for anti-ballistic composite," in Autex 2007 - the 7th Annual Textile Conference, Tampere, Finland, 26-28 June, 2007.
- [200] F. Boussu, V. Begus, and J.L. Petitniot, "Composite textile structure for ballistic protection," in Industrial Simulation Conference, Eurosif – ETI Publication, University of Palermo, Italy, June 5 – 7 2006, pp. 330-332.
- [201] F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "Energy absorption inside a 3D Textile Composite Structure," in The Fiber Society Spring 2008 Conference, Mulhouse, France, May 14–16, 2008.
- [202] F. Boussu and X. Legrand, "Delamination behaviour of 3D Warp Interlock Structures," in First world conference on 3D fabrics and their applications, University of Manchester, UK, April 10-11 2008.
- [203] F. Boussu, F. Veyet, and M. Lefebvre, "Recent Advances in Textile Composite for Impact Protection," in NATO Advanced Research Workshop on Textile Composites, Kiev, Ukraine, May 18-21, 2009, pp. 5 -6.
- [204] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Study of impact behaviour of three warp interlock structures. Comparison with existing protections," in LWAG Light-Weight Armour for Defence & Security, Haifa, Israël, March 2011.
- [205] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Influence of warp interlock parameters on the ballistic behaviour of a structure," in 10th International Conference on Textile Composites, Lille, France, October 26–28, 2010, pp. 322-328.
- [206] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Influence des paramètres de tissage sur des structures interlock soumises à l'impact balistique," in JNC 17, Journées Nationales Composites, Poitiers, France, 15 au 17 Juin 2011.
- [207] B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, D. Vallee, and F. Rondot, "New 3D warp interlock composite for armouring of vehicles," in 4th RMUTP International Conference: Textiles & Fashion, Bangkok, Thailand, 3-4 July 2012.
- [208] M. Lefebvre, F. Boussu, D. Coutellier, and D. Vallee, "Influence of the geometrical structures and resin rate inside composites structures on the ballistic behaviour under high velocity impact," in Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Politecnico di Torino, Italy, 18-20 June 2012.
- [209] B. Provost, F. Boussu, and D. Coutellier, "2D and 3D warp interlock composites under high velocity impacts," in 4th World conference on 3D fabrics and their applications, Aachen, Germany, September 10th – 12th, 2012.
- [210] B. Provost, F. Boussu, and D. Coutellier, "2D laminated and 3D warp interlock fabric under high velocity impact," in ICCE-19: 19th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering, Shanghai, China, July 24-30, 2011.
- [211] B. Provost et al., "Études des différents dommages causés par un impact haute vitesse sur des composites à renforts 2D et 3D," in Rencontre du Groupe de Travail MécaDymat, Comportement et rupture des matériaux sous sollicitations dynamique, Lyon, France, Du 3 au 4 mai 2012.
- [212] B. Provost et al., "Comparison of damages on 2D and 3D warp interlock fabric due to high velocity impact," in Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Politecnico di Torino, Italy, 18-20 June 2012.
- [213] F. Boussu, B. Provost, D. Coutellier, D. Vallee, and F. Rondot, "New 3D textile composite hybrid solutions against high velocity impact," in SAMPE Tech 2012, North Charleston, SC, USA, October 22-25 2012.
- [214] J. Vilfayeu, D. Crepin, F. Boussu, D. Soulat, and P. Boisse, "Development of a finite element model for the weaving process," in TEXCOMP 11 Conference, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [215] V. Koncar and F. Boussu, "Flexible Displays on Textiles for Personal Protection," in Proceedings of the NATO advanced research Workshop on Intelligent Textiles for Personal Protection and Safety, Zadar, Croatia, September 7-10, 2005, pp. 65-88.
- [216] F. Boussu and X. Legrand, "Technical and economical performances of 3d warp interlock structures," in SENDA 08, Monastir, Tunisie, Du 08 au 10/05/2008.
- [217] F. Boussu, X. Legrand, and X. Flambard, "Textile composite: new challenge for industries," in Futurotextiel 08, 2nd International scientific conference "Textiles of the Future", Kortrijk, Belgium, 13 – 15 november 2008.
- [218] X. Legrand, F. Boussu, P. Blot, and D. Guittard, "A new technique of weaving 3d surface: Application to carbon/epoxy corner fitting plies," in ESAFORM Conference, Twente, Netherlands, 27 to 29th April 2009.
- [219] J. Van Roey, L. Rabet, A. Imad, B. Reck, and F. Boussu, "An analysis of the projectile velocity decrease during the penetration of ballistic fabric," in 19th DYMAT Technical Meeting, Strasbourg, France, 02 December 2010.
- [220] B. Provost, F. Boussu, M. Lefebvre, and J. Nussbaum, "Comportement spécifique de structure 3D interlock tissée contre les impacts à haute vitesse," in JNC 17, Journées Nationales Composites, Poitiers, France, 15 au 17 Juin 2011.
- [221] S.G. Ivanov et al., "Meso-FE models of tight 3D woven structures," in European Conference on Composite Materials (ECCM-15), Venice, Italy, 24-28 June 2012.
- [222] X. Legrand et al., "MAPICC3D: 3D textile technologies for auto-stiff panels," in TEXCOMP 11 Conference, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [223] L. Russcher et al., "Modelling the microstructure of multilayer woven fabrics," in 13th AUTEX World Textile Conference, Dresden, Germany, May 22nd to 24th 2013.
- [224] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, D. Soulat, and P. Ghys, "Forming behaviour of 3D warp interlock fabric to produce tubular cross composite part," in 14th AUTEX conference, Bursa, Turkey, 26 to 28 May 2014.
- [225] C. Florimond et al., "Numerical simulation chain applied to woven fabrics," in 14th AUTEX conference, Bursa, Turkey, 26 to 28 May 2014.
- [226] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, and D. Soulat, "New composite tubular cross handle using 3D warp interlock fabric," in 1st International Conference on Mechanics of Composites, Long Island, NJ, USA, June 8-12, 2014.
- [227] N. Trifigny, F. Boussu, V. Koncar, and D. Soulat, "Quality improvement of composite material fibrous reinforcement using innovative sensor yarns," in 1st International Conference on Mechanics of Composites, Long Island, NJ, USA, June 8-12, 2014.
- [228] F. Boussu, B. Provost, M. Lefebvre, D. Coutellier, and D. Vallee, "Experimental studies on high velocity impact on vehicle armoring," in 1st International Conference on Mechanics of Composites, Long Island, NJ, USA, June 8-12, 2014.
- [229] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, and D. Soulat, "Experimental Forming studies on thick 3D warp interlock fabrics," in 16th European

Conference on Composite Materials (ECCM16), Seville, Spain, June 22 - 26, 2014, Thematic session: "Mechanical behaviour of textile reinforcements and performance of textile composites.

- [230] F. Boussu, M. Lefebvre, B. Provost, D. Coutellier, and D. Vallée, "Experimental and high velocity impact studies on hybrid armor using metallic and 3D textile composites," in CAMX, Orlando, FL, USA, October 13-16, 2014.

#### **VB : Valorisation et brevets**

- [44] V. Koncar, C. Nocito, and L. Raymond, "Composite enroulable photovoltaïque et dispositif de protection solaire comportant un tel composite," Brevet FR 2935540 (A1), Mar. 05, 2010.
- [45] V. Koncar, C. Nocito, and L. Raymond, "Composite enroulable photovoltaïque et dispositif de protection solaire comportant un tel composite," Brevet EP 2159849 (A2), Mar. 03, 2010.
- [46] C. Nocito, L. Raymond, and F. Boussu, "Dispositif de protection solaire de type store muni d'un système de production d'énergie électrique," Brevet FR-1057805, Mar. 30, 2012.
- [47] C. Nocito, L. Raymond, and F. Boussu, "Dispositif de protection solaire de type store muni d'un système de production d'énergie électrique," Brevet EP 2434070 (A1), Mar. 28, 2012.
- [48] C. Nocito, L. Raymond, and F. Boussu, "Awning type solar protection device equipped with an electrical power production system," Patent US-13/247335, Sep. 28, 2011.
- [231] F. Boussu and V. Begus, "Method of manufacturing a composite, especially a bulletproof composite, and composite obtained," EP 2.153.159, Dec. 8, 2010.
- [232] F. Boussu and V. Begus, "Method of manufacturing a composite, especially a bulletproof composite, and composite obtained," WO 152337 A1, Dec. 18, 2008.
- [233] F. Boussu and V. Begus, "Procédé de fabrication d'un matériau composite, notamment pour la protection balistique, et matériau composite obtenu," FR 755511, June 07, 2007.

#### **AFF : Communications par affiche dans un congrès international ou national**

- [34] F. Boussu and J.L. Petitnot, "Development of Shape Memory Alloy fabrics for damping and shape control of composite structures," in *World Textile Conference - 2nd AUTEX Conference, Textile Engineering at the dawn of a new millennium: an exciting challenge*, Bruges, Belgium, 1-3 July 2002, p. 590.
- [234] J. Nussbaum, N. Faderl, R. Nuesing, C. Ha-Minh, and F. Boussu, "Development of a new method to determine dynamic tensile strength of ballistic yarns," in EPJ Web of Conferences, vol. 26, 2012.
- [235] B. Provost, F. Boussu, D. Coutellier, M. Lequin, and K. Thorat-Pierre, "Improvements of ballistic simulations using a more realistic fibrous reinforcement modelling," in TEXCOMP 11 Conference, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.
- [236] J. Vilfayeau, F. Boussu, and J. Nussbaum, "3D flexible hybrid textile structures against high velocity impact," in 26th International Symposium on Ballistics, Miami, FL, US, September 12-16, 2011.
- [237] C. Chevalier, J. Nussbaum, and F. Boussu, "Experimental Study on the Influence of Weaving Parameters on the Ballistic Performances of 3D Fabrics," in International Ballistic Symposium, Freiburg, Germany, 22 to 26 April 2013.
- [238] F. Boussu, X. Legrand, and V. Koncar, "A model of energy absorption using multi-layers fabrics to improve ballistic impact fracture," in 18th DYMAT Technical Meeting, Bourges, France, September 10-12, 2008, pp. 141-146.
- [239] M. Lefebvre, F. Boussu, D. Coutellier, and D. Vallée, "Influence of the vacuum resin process, on the ballistic behaviour of lightweight armouring solutions combining aluminium plates and warp interlock fabrics impacted with a Fragment Fragment Simulating Projectile," EPJ Web of Conferences, vol. 26, 2012.
- [240] B. Provost et al., "High velocity impact on different hybrid architectures of 2D laminated and 3D warp interlock fabric composite," EPJ Web of Conferences, vol. 26, 2012.
- [241] C. Ha-Minh, F. Boussu, and K. Thorat Pierre, "Ktex\_Pattern: Numerical Tool for Textile Fabrics Submitted to Ballistic Impact," in 10th International Conference on Textile Composites, Lille, France, October 26-28, 2010, p. Poster.
- [242] C. Florimond et al., "NUMTISS: Chaîne numérique de modélisation du procédé de tissage, de la structure tissée et de son mode d'imprégnation," in Comptes Rendus des JNC 18 - École Centrale Nantes, Nantes, France, du 12 au 14 juin 2013.
- [243] C. Florimond et al., "NUMTISS : Numeric chain of simulation and modelling of the weaving process," in TEXCOMP 11 Conference, Leuven, Belgium, 16 to 20 September 2013.

#### **COM : Communications orales sans actes dans un congrès international ou national**

- [36] V. Koncar and F. Boussu, "Intégration actuelle et future des textiles intelligents au sein de l'habacle automobile," in *DEC/AUTEX 2006*, Mulhouse, France, From 30/11 to 01/12/2006.
- [49] F. Boussu and V. Koncar, "Cellules photovoltaïques flexibles : possibilités d'intégration dans des structures textiles," in colloque SF2M, Société Française de Métallurgie et de Matériaux, Section Nord, Maubeuge, France, 19 novembre 2009.
- [244] M. Happiette, F. Boussu, B. Rabenasolo, and C. Vasseur, "Tableau de bord et indicateurs de performances logistiques, la réactivité dans la filière Textile/ Habillement /Distribution," in Journée technique et scientifique de l'ENSAIT, 8 juin 1995.
- [245] B. Rabenasolo and F. Boussu, "Logistique Textile. Les applications industrielles et les perspectives," in Journée technologique ENSAIT : L'apport de la recherche en logistique textile, Roubaix, France, 08/02/2001.
- [246] F. Boussu, "Logistique Textile. La logistique et la mode : les enjeux de l'innovation," in Journée Technologique ENSAIT, Roubaix, France, 24/01/2002.
- [247] F. Boussu, I. Cristian, and X. Legrand, "General specification of warp interlock structure: application for carbon fiber multi-layer fabrics," in Avantex techtextil symposium, Frankfurt, Germany, from 16/06/2009 to 17/06/2009.
- [248] F. Boussu, V. Begus, X. Flambard, and X. Legrand, "A new textile solution for anti-ballistic composite," in TechTextil Symposium, Composite Material session 13th of June 2007, Frankfurt, Germany, 11 - 14 June 2007.
- [249] M. Lefebvre, B. Provost, and F. Boussu, "Behaviour of warp interlock structures under and IEDs attack, application to orthogonal and



- through the thickness warp interlocks," in NATO Advanced Study Institute "Defence Related Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC (Nuclear, Biological, Chemical) Protection", Split, Croatia, Tuesday 6th April to Friday 16th April 2010.
- [250] F. Boussu, "Solutions textiles pour la protection balistique - Application au blindage des véhicules terrestres ou aéroportés," in FUTEX, Marcq en Baroeul, France, 10 et 11 janvier 2007.
- [251] F. Boussu, "Tissage des renforts composites - applications en balistique," in Journée Scientifique GEMTEX (ENSAIT)/TPCIM (EMD), Roubaix, France, 16/05/2012.

### Thèses de doctorat

- [2] F. Boussu, "Simulation de la filière Textile/habillement/distribution: réduction de la complexité en vue d'une meilleure prévision des ventes," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 12/01/1998.
- [43] C. Nocito, "Développement d'un textile intégrant des cellules photovoltaïques pour application de protection solaire store enroulable," Université de Lille1, Villeneuve d'Ascq, France, Thèse de doctorat 03/11/2010.
- [50] J. Elfheri, "Support médical avancé anti-escarre – approche système," Université de Lille 1, Villeneuve d'Ascq, France, Thèse de doctorat 18/11/2010.
- [53] C. Ha-Minh, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 17/11/2011.
- [54] M. Lefebvre, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 07/12/2011.
- [55] S. Nauman, "Geometrical modelling and characterization of 3D warp interlock composites and their on-line structural health monitoring using flexible textile sensors," University of Lille 1, Lille, Ph-D thesis 24/03/2011.
- [56] B. Provost, "Étude et Réalisation d'une solution à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 14/01/2013.
- [57] N. Trifigny, "Mesure in-situ et connaissance des phénomènes mécaniques au sein d'une structure tissée multicouches," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 09/12/2013.
- [58] J. Van Roey, "Étude du comportement dynamique des matériaux granulaires et tissés: approche expérimentale et simulation numérique," Ecole Royale Militaire, Bruxelles, Belgique, Thèse de doctorat 16/12/2011.
- [59] J. Vilfayeu, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," Thèse de doctorat 13/03/2014.
- [60] C. Chevalier, "Détermination des caractéristiques dynamiques des structures fibreuses," Université de Valenciennes, Valenciennes, France, Thèse de doctorat en cours début 01/10/2012.
- [61] C. Dufour, "Conception et optimisation des structures tissées interlocks pour optimisation de la mise en forme 3D des renforts fibreux de matériau composite," Université de Lille 1, Villeneuve d'ascq, France, Thèse de doctorat début de la thèse 01/09/2012.

### Projet de fin d'études (ingénieurs/masters)

- [1] F. Boussu, "Aide à la décision par décomposition temporelle des ordres de fabrication. Résolution par construction descendante hiérarchique," Université de Lille 1, Lille, France., DEA Automatique et Informatique Industrielle 05/07/1992.
- [29] G. Bailleul, "Élaboration de matériaux composites à base de tissus métalliques," ENSAIT, Roubaix, France, Projet de fin d'études 1999.
- [30] M. Jaron, "Tissu Technique : Quel avenir pour les tissus à mémoire de forme," ENSAIT, Roubaix, France, Projet de fin d'études 2001.
- [31] B. Draoui, "Etude de matériaux composites à base d'un tissé en alliages à mémoire de forme - Tests d'amortissement," ENSAIT, Roubaix, France, Projet de fin d'études 2002.
- [40] B. Degasnes, "Réalisation d'un tissu intégrant un circuit électrique à vocation chauffante (intégrable dans un gant)," ENSAIT, Roubaix, France, Projet de fin d'études 2007.
- [41] A. Sigaud, "Store à bandes verticales chauffant," ENSAIT, Roubaix, France, Projet de fin d'études 2008.
- [42] C. Nocito, "Étude des matériaux pour l'intégration de cellules photovoltaïques sur les stores," ENSAIT, Wasquehal, France, Master MPT 2008.
- [62] M. Baudoin, "Nouvelle solution composite textile pour la protection contre les fragments engendrés par un IED," ISL, Saint-Louis, France, Projet de fin d'études 2011.
- [63] V. Begus, "Nouvelle solution textile pour composite anti-balistique," ENSAIT, Roubaix, France, Master E-team 2006.
- [64] C. Chevalier, "Étude de l'influence de paramètres intrinsèques à un tissu interlock sur ses propriétés balistiques," ISL, Saint-Louis, France, Projet de fin d'études 2012.
- [65] J. Codina, "Développement d'une tenue pare-coups pour le maintien de l'ordre," Groupe MARCK, Argenteuil, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2011.
- [66] B. Everaert, "Mise au point d'un tissu technique mouable à base de Twintex," SAINT GOBAIN - VETROTEX, Chambéry, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2003.
- [67] P. Garin, "Élaboration d'un blindage composite contre les menaces de type « Armour Piercing »,," Renault Truck Defence, Satory, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2012.
- [68] M. Guillot, "Caractérisation mécanique dynamique de multi-filaments," ONERA, Lille, France, Projet de fin d'études 2010.
- [69] A. Lecas, "Nouvelle technologie de structuration textile pour pièce aéronautique," AIRCELLE - groupe SAFRAN, Le Havre, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2010.
- [70] S. Lecomte, "Etude de matériaux composites à base de tricot et d'un tissu mixte alliage à mémoire de forme et Aramide," MS COMPOSITES, Liévin, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2004.
- [71] M. Lefebvre, "Structures 3D dans la lutte contre les IEDs," ISL, Saint Louis, France, Projet de fin d'études 2008.
- [72] C. Lorin, "Tissage 3D : Intégration de lisières et développement de préformes spécifiques," Groupe CTT, Saint Hyacinthe, Canada, Projet de fin d'études ENSAIT 2012.

- [73] J. Maillet, "Développement d'une nouvelle solution balistique souple dans le cadre du projet EPIDARM," OUVRY, Lyon, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2008.
- [74] S. Nauman, "Modélisation Géométrique de tissu 3D Interlock," Laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, Master report 2008.
- [75] N. Nawab, "Etude de moulabilité des tissus 3D multi-couches interlocks," ENSAIT laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, Master MPT ENSAIT 2009.
- [76] J. Pariente, "New 3D textile solution for anti-ballistic structures," Gemtex Laboratory, Roubaix, France, Master MPT ENSAIT 2011.
- [77] B. Provost, "Développement d'un tissu balistique contre les fragments à haute vitesse," ISL, Saint Louis, France, Projet de fin d'études 2009.
- [78] A. Serret, "Amélioration de la résistance au dépliage d'une cornière composite (Carbone/Epoxy)," AIRBUS, Toulouse, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2007.
- [79] S. Taing, "Amélioration des performances d'un gilet discret contre les balles et coups de couteaux et diminution du trauma arrière," PROTECOP, Bernay, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2007.
- [80] J. Vilfayeau, "Recherche d'une nouvelle solution composite textile pour la protection contre les fragments engendrés par un IED," ISL, Saint Louis, France, Projet de fin d'études 2010.
- [81] N. Voisin, "Analyse des performances des métiers à tisser," ULSTER CARPET, Londonderry, Irlande, Projet de fin d'études ENSAIT 2000.
- [82] C. Dufour, "Faisabilité de la préforme de rail de poutre RTM," AIRCELLE - Groupe SAFRAN, Le Havre, France, Projet de fin d'études ENSAIT 2012.

### **Rapports internes et Projets**

- [83] I. Christian, "Optimisation des caractéristiques mécaniques des structures tissées multi-couches interlock," Agence Universitaire de la Francophonie, Roubaix, France, Rapport de Bourse post-doctoral du 06/10/2008 au 06/04/2009.
- [84] C. Dufour and F. Boussu, "Report about the performances and limits of demonstrator for a 3D preform, plan for scale up and optimization," ENSAIT, Roubaix, France, Deliverable 3.15 - WP3 Development of 3D shape preforms in one step for panels and stiffeners at pilot scale IP7 MAPICC 3D, 28/02/2014.
- [85] F. Boussu, F. Veyet, and N. Dumont, "Développement d'une machine prototype de tissage pour la réalisation d'échantillons textile 2,5D," OSEO, Lille, France, Projet privé A0807017N, 03/11/2008 - 03/05/2009.
- [86] F. Boussu and C. Dufour, "Modification of the loom devices," ENSAIT, Roubaix, France, Milestone MS5 - WP3 Development of 3D shape preforms in one step for panels and stiffeners at pilot scale Projet IP7, MAPICC 3D, 24/02/2014.
- [87] F. Boussu, N. Trifigny, A. Lecas, and X. Legrand, "Réalisation d'échantillons pour pièce de type corps de poutre en composite textile," AIRCELLE - Groupe SAFRAN, Le Havre, France, Projet privé du 01/09/2010 au 31/12/2010.
- [88] F. Boussu and C. Dufour, "Samples and report about the characterization of 3D preforms obtained by the demonstrator," ENSAIT, Roubaix, France, Deliverable 3.13 - WP3 Development of 3D shape preforms in one step for panels and stiffeners at pilot scale Project IP7 MAPICC 3D, 25/01/2013.
- [89] F. Boussu et al., "Solution nouvelle de protection balistique à base Nano Tube de Carbone et Textile," DGA, Bagneux, France, Projet privé REI-DGA, SNCTex, 01/09/2009 - 01/06/2012.

# Curriculum Vitae

## **BOUSSU François**

Date de naissance : 08/03/69

Grade : Maître de Conférences

Établissement d'affectation : ENSAIT (Roubaix)

Qualifié aux fonctions de Maître de Conférences le 08/04/1998

Bénéficiaire d'une Prime d'Excellence Scientifique depuis le 01/01/2012 (notes A/A/B/A)

Situation Familiale : Marié, 5 enfants

Adresse Personnelle : 240B chemin du paradis, 59190 Caestre, France.

Adresse Professionnelle : ENSAIT, 2 allée Louise et Victor Champier, BP30329,  
59056 Roubaix Cedex 01, France.

Adresse mail : francois.boussu@ensait.fr

Mobile: +33 626883959



## 1. Parcours professionnel

Diplôme d'ingénieur ENSAIT 1992

**DEA Automatique et Informatique Industrielle** - Université de Lille 1 - soutenu le 05/07/1992 - intitulé : Aide à la décision par décomposition temporelle des ordres de fabrication. Résolution par construction descendante hiérarchique.

**Directeur de production** en Tunisie - société JBT (loi 72) filiale française sous douane - du 01/09/1992 au 01/02/1994

**Directeur de production** en France - société VICTOR MACHU à Béthencourt (59) - du 01/04/1994 au 31/12/1994

**Chef de Travaux Pratiques** à l'ENSAIT du 01/01/1995 au 01/09/1995 - enseignement tissage (592 heures TP)

**Professeur Associé**, ENSAIT du 01/09/1995 au 01/09/1998 - enseignement tissage (592 heures TP)

**Thèse de doctorat** Université de Lille 1 - Automatique et informatique industrielle - soutenue le 12/01/1998

Titre de la thèse: Simulation de la filière Textile/habillement/distribution: réduction de la complexité en vue d'une meilleure prévision des ventes.

Composition du Jury de thèse:

- Christian VASSEUR, Président et Directeur de Recherche
- Joël FAVREL, Rapporteur
- Gérard GOVAERT, Rapporteur
- Michel HAPPIETTE, Co-directeur
- Jean Marie CASTELAIN, Examineur
- Pascal YIM, Examineur
- Jean Jacques DENIMAL, Examineur

**Maître de conférences** à l'ENSAIT 61<sup>ème</sup> section, depuis le 01/09/1998.

Membre du Laboratoire GEMTEX (EA n°2461, ENSAIT) depuis 01/01/1995

## 2. Encadrement doctoral et scientifique

**Bilan encadrement** : 11 thèses de doctorat (dont 2 en cours) ; 49 projets de fin d'études (ingénieur/master)

### Thèses de doctorat soutenues

Christophe NOCITO [1], Thèse de l'Université de Lille 1, "Développement d'un textile intégrant des cellules photovoltaïques pour application de protection solaire store enroulable", Soutenue le 3 novembre 2010, directeur de thèse : Vladan KONCAR, co-encadrement : **François BOUSSU**, financement : thèse CIFRE - société DICKSON CONSTANT, devenir : Ingénieur chargé d'évaluation au CSTB

Jalloul ELFHERI [2], Thèse de l'Université de Lille 1, "Support médical avancé anti-escarre – approche système", soutenue le 18/11/2010, directeur de thèse : Vladan KONCAR, co-encadrement : **François BOUSSU**, financement : bourse régionale, devenir : Ingénieur d'Études société ALTRAN.

Saad NAUMAN [3], Thèse de l'Université de Lille 1, "Geometrical modelling and characterization of 3D warp interlock composites and their on-line structural health monitoring using flexible textile sensors", soutenue le 24/03/2011, directeur de thèse : Vladan KONCAR, co-encadrement : **François BOUSSU**, financement : bourse SFERE, devenir: Post -doc laboratoire GEMTEX.

Cuong HA-MINH [4], Thèse de l'Université de Lille 1, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique", soutenue le 17/11/2011, directeur de thèse : Abdellatif IMAD (Polytech Lille), co-encadrements : **François BOUSSU**, Toufik KANIT (Polytech Lille), financement : contrat EDA projet EPIDARM, devenir : Maître de conférence à l'ENS Cachan.

Marie LEFEBVRE [5], Thèse de l'Université de Valenciennes, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules", soutenue le 07/12/2011, directeur de thèse : Daniel COUTELIER (UVHC), co-encadrement : **François BOUSSU**, financement : contrat REI-DGA projet SAFE, devenir : Docteur en recherche société HERAKLES groupe SAFRAN.

Jan VAN ROEY [6], Thèse de l'Université de Lille 1 et de l'École Royale Militaire de Bruxelles, "Étude du comportement dynamique des matériaux granulaires et tissés: approche expérimentale et simulation numérique", soutenue le 16/12/2011, directeur de thèse : Luc RABET (École Royale Militaire de Bruxelles), Abdellatif IMAD (Polytech Lille), co-encadrement : **François BOUSSU**, financement : bourse ERM, devenir : Officier chez Brandweer Antwerpen.

Benjamin PROVOST [7], Thèse de l'Université de Valenciennes, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules", soutenue le 14/01/2013, directeur de thèse : Daniel COUTELIER (UVHC), co-encadrement : **François BOUSSU**, financement : contrat DGA projet MAPRE, devenir : Docteur en recherche société AIRCELLE groupe SAFRAN.

Nicolas TRIFIGNY [8], Thèse de l'Université de Lille 1, "Mesure in-situ et connaissance des phénomènes mécaniques au sein d'une structure tissée multicouches", soutenue le 09/12/2013, directeur de thèse : Vladan KONCAR, co-encadrement : **François BOUSSU**, financement : ANR projet NUMTISS, devenir: recherche d'emploi.

Jérôme VILFAYEAU [9], Thèse de l'Université de Lyon, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites", soutenue le 13/03/2014, directeur de thèse : Philippe BOISSE (INSA de Lyon), co-encadrements : **François BOUSSU**, David CREPIN, devenir: recherche d'emploi.

### Thèses de doctorat en cours

Clément DUFOUR [10], Thèse de l'Université de Lille 1, "Conception et optimisation des structures tissées interlocks pour optimisation de la mise en forme 3D des renforts fibreux de matériau composite", début Septembre 2012, directeur de thèse : Damien SOULAT, co-encadrements : **François BOUSSU**, Peng WANG, Financement : programme Européen MAPPIC 3D

Caroline CHEVALIER [11], Thèse de l'Université de Valenciennes, "Détermination des caractéristiques dynamiques des structures fibreuses", début octobre 2012, directeur de thèse : Daniel COUTELIER (UVHC), co-encadrements : **François BOUSSU**, Christophe KERISIT (ISL), Financement : bourse ISL.

Encadrement tuteur universitaire principal des étudiants en projet de fin d'études (ingénieur) et masters recherche

**Bilan** : 49 projets de fin d'études (ingénieur/master) soutenus pendant la période 1998 - 2013 (voir Annexe 1).



### 3. Rayonnement et Responsabilités scientifiques

#### Bilan de la valorisation scientifique

Total	Types de valorisation scientifique
11	OS : Ouvrages scientifiques (ou chapitres de ces ouvrages)
0	OV : Ouvrages de vulgarisation (ou chapitres de ces ouvrages)
24	ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées dans les bases de données internationales
8	ACLN : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture non répertoriées dans les bases de données internationales
4	INV : Conférences données à l'invitation du comité d'organisation dans un congrès international ou national
127	ACT : Communications avec actes dans un congrès international ou national
6	VB : Valorisation et brevets
11	AFF : Communications par affiche dans un congrès international ou national
10	COM : Communications orales sans actes dans un congrès international ou national

#### Participation à des Jurys de thèse:

Membre invité du jury de thèse de l'Université de Lille 1 de Patrick LAPEYRONNIE [12], soutenue le 14/12/2010, intitulée: Mise en œuvre et comportement mécanique de composites organiques renforcés de structures 3D interlocks, sous la direction de Christophe BINETRUY et co-encadrement de Philippe LE-GROGNEC.

Membre invité du jury de thèse de l'Université de Toulouse d'Amélie KOLOPP [13], soutenue le 16/11/2012, intitulée: Impact sur structures sandwichs pour applications de blindage aéronautique, sous la direction de Samuel RIVALLANT et co-encadrement de Christophe BOUVET.

Membre invité du jury de thèse de l'Université de Lyon de Charlotte FLORIMOND [14], soutenue le 29/11/2013, intitulée: Contributions à la modélisation mécanique du comportement de mèches de renforts tissés à l'aide d'un schéma éléments finis implicite, sous la direction d'Emmanuelle VIDAL-SALLE.

#### Membre de comité de sélection:

Membre du comité de sélection pour le recrutement d'un Maître de Conférences en 60<sup>ème</sup> section à l'ENSAIT. Avril-Mai 2012.

#### Reviewer d'articles scientifiques dans des revues internationales :

Defence Technology, Composite part B, Composite Science and Technology, Journal of Industrial Textile, Textile Research Journal, Mechanic of Materials, International Journal of Material Forming, International Journal of Textile Science and Technology, Journal of Strain Analysis for Engineering Design.

Review of book entitled : Weaving of Technical Fabrics, Editor Bentham Science Publishers.

#### Expertise de programmes Nationaux

**Expertise** du dossier INTERLOCK3D (Comportement mécanique multi-échelles d'interlocks 3D) de l'ANR 2013 programme MATEPRO

**Expertise** du dossier RES3D (REServoir embarqué haute pression à structuration composite 3D) de l'ANR 2010 programme MATEPRO

**Expertise** technico-économique pour OSEO du projet A0612007N relatif au développement de nouvelles structures textiles 3D directement réalisées sur métier à tisser (société TRP CHARVET) - 02/02/2007

#### Responsabilités scientifiques

**Membre du comité scientifique** de International Journal of Textile Science and Technology (2011 – présent)

**Membre du comité scientifique** du 5th International Technical Textiles Congress se déroulant du 7 au 9 novembre 2012, à Izmir, Turquie

**Co-directeur scientifique** de la conférence internationale TEXCOMP10 (TEXtile COMPOSITE) avec le professeur Christophe BINETRUY (EMD), à Lille du 26 au 28 octobre 2010. **Co-éditeur** des actes du congrès TEXCOMP10 intitulé "Recent Advances in Textile Composites", ISBN: 978-1-60595-026-6, Oct. 2010, 578 pages

**Membre du comité scientifique** du congrès TEXCOMP11 à Leuven, Belgique du 16 au 20 septembre 2013 et TEXCOMP12 à Raleigh en 2015, Caroline du Nord, USA.

**Participation** au montage scientifique d'une Conférence NATO Advanced Study Institute intitulée: "Defense Related Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC (Nuclear, Biological, Chemical) Protection", qui s'est déroulée à Split (Croatie) du 6 au 16 avril 2010

**Collaboration de recherche** (AUF) avec l'université de Iasi (Roumanie) sur l'optimisation des caractéristiques mécaniques des structures tissées multi-couches interlock (post doc Irina CRISTIAN 09/2008 - 04/2009)

**Responsable** de la dissémination scientifique du programme MAPICC3D - Dissemination manager (2012 -2015)

## **Participations à des programmes de recherche Nationaux, Internationaux et Privés**

### **Programmes Nationaux**

Projet AIDE (Conception d'un logiciel d'Analyse et d'Intégration des Données EDI pour une meilleure prévision technique et commerciale), APP Ministère de l'Industrie, budget total 4 923 779 Francs, **Co-responsable** du montage et de l'écriture du projet, (01/09/1996 - 01/09/1999)

Projet NUMTISS (Numeric Modelling of the fibrous material weaving process for composite materials), ANR-09-MAPR-0018, programme MATetPRO, budget total 1 076 735 €, **Coordinateur Scientifique** du projet, (01/03/2010 - 31/12/2013).

### **Programmes Internationaux**

Projet IP (Integrated Project) 7ème PCRD, MAPICC 3D (Manufacturing systems for 3D-shaped, multilayered products based on flexible materials), **Responsable scientifique** du WT SECURE - RESCUE PLAN, budget total 9 077 524 €, (01/05/2011-30/04/2014)

Projet Collectif financement EDA European Defence Agency, EPIDARM (European Protective Individual Defence ARMour), **responsable scientifique** du WP2 (Fibrous and Textile protective solutions), budget total de 2 353 401 €, (01/10/2008 - 01/10/2011)

Projet IMS&CPS, 7ème PCRD, Élaboration de matériaux textiles pour des composites pour l'industrie ferroviaire et aéronautique, **co-responsable scientifique** de la réalisation du tissage à base de fils nano-structurés et conception/réalisation d'une machine à tisser pour tissu interlock 3D à base de fils de carbone, budget total 418 264,89 €, (01/10/2010 - 01/10/2013).

Projet RESIST, (Réseau de Soutien à l'Innovation Scientifique et Technologique pour le Textile), INTERREG III France (Nord - Pas de Calais) - Belgique (Flandres et Wallonie), **coordinateur principal** de Janvier 2005 à Juillet 2007, (durée total du programme 01/06/2004 - 01/07/2007)

Objectifs principaux:

- Développer la compétitivité dans les entreprises transfrontalières de la filière textile

- Intégrer des avancées technologiques et organisationnelles issues de :

- La définition de méthodologies (action 1)

- La réalisation de diagnostics industriels (action 2)

- La mise en place d'une formation diplômante (action 3)

Liste des séminaires RESIST réalisés:

Date	Sujet	Lieu
9/12/04	Analyse sensorielle	U.GAND
22/02/05	Textile intelligent et fibres conductrices	U.GAND
16/11/05	Textiles Biologiques	ENSAIT
19/01/06	Fils fantaisie	U.GAND
11/04/06	Mass customisation	ENSAIT
9/06/06	Textiles médicaux	U.GAND
21/11/06	Supply chain	ENSAIT
14/12/06	Électrostatique	ENSAIT
14/02/07	Textiles for heat protection	U.GAND
12/04/07	Automobiles	LILLE GP

Projet TRITEX INTERREG IV France (Nord - Pas de Calais) - Belgique (Flandres), **responsable** de la rédaction du projet et son dépôt en juillet 2008 (budget de 1 049 603 €) (01/01/2009 - 31/12/2012) [15].

Dans la continuité de RESIST (Réseau de Soutien à l'Innovation Scientifique et Technologique pour le Textile) – INTERREG III

Nouveau défi : évolution des séminaires de formation vers de nouvelles activités de recherche et offre de formation à distance (E-learning)

### **Programmes de recherche privés**

Projet privé DUBAR WARNETON (développement d'un tissu à base de fils à mémoire de forme), **responsable scientifique**, budget total de 65 000 Francs, (01/02/1999 - 30/09/1999).

Projet privé ONERA Lille (Étude de matériaux composites à base d'un tissé en alliages à mémoire de forme, **responsable scientifique**, budget total de 6 800€, (01/02/2002 - 30/09/2002).

Projet privé SAINT GOBAIN - VETROTEX (Mise au point d'un tissu technique moulable à base de Twintex), **responsable scientifique**, budget total de 6 400€, (01/02/2003 - 30/09/2003).

Projet privé MS COMPOSITES (Étude de matériaux composites à base de tricotés et d'un tissu mixte alliage à mémoire de forme et Aramide), **co-responsable scientifique**, budget total de 12 600€, (01/02/2004 - 30/09/2004).

Projet privé ANVAR (Analyse technico-économique d'un logiciel de prévision de vente adaptée aux articles textiles), **co-responsable scientifique** en collaboration avec Jean-Jacques DENIMAL de l'université de Lille 1, budget total de 55 000 Francs (01/06/2000 - 01/03/2001)

Projet privé OSEO (Conception d'un logiciel d'analyse et de prévision des ventes appliquées aux articles textiles: TEXTILE ANALYSIS), **responsable scientifique** en collaboration avec Jean-Jacques DENIMAL de l'université de Lille 1, budget total de 235 000 Francs (01/09/2001 - 31/12/2004)

Projet privé Store PV (Intégration de cellules photovoltaïques aux stores), budget total de 1 050 130€, société Dickson Constant, **co-responsable scientifique** du projet, (01/09/2007 – 01/09/2010)

Projet privé OSEO, A0709018N, **responsable scientifique** d'une étude d'opportunité d'un transfert de technologie. Nouvelle structure textile brevetée qui présente de hautes propriétés en protection balistique, budget total de 51 000 €, (22/10/2007 - 30/09/2008)

Projet privé OSEO, A0807017N, **responsable scientifique** du développement d'une machine prototype de tissage pour la réalisation d'échantillons textile 2,5D, dans le but de fournir des échantillons de tissus pour qualification et ce dans le cadre d'une préparation d'un transfert de technologie dans le domaine de la balistique, budget global de 321 750 €, (03/11/2008 - 03/05/2009).

Projet privé REI-DGA, SAFE (Structural Armour For Explosive protection) budget total de 285 246 €, **responsable scientifique** du projet, (01/12/2008 - 31/12/2011).

Projet privé REI-DGA, SNCTex (Solution nouvelle de protection balistique à base Nano Tube de Carbone et Textile) budget ENSAIT de 138 000 €, **co-responsable scientifique** du projet, (01/09/2009 - 01/06/2012).

Projet privé MAT-IED (Étude et compréhension du comportement des solutions matériaux pour la protection des véhicules contre les EEL) avec la société NEXTER, budget total 1 250 350 €, **responsable scientifique** solution menace A (01/01/2010 - 31/12/2012)

Projet privé AIRCELLE - Groupe SAFRAN, budget total de 58 500 €, **responsable scientifique** de la réalisation d'échantillons ainsi qu'un corps de poutre en composite textile (01/09/2010 au 31/12/2010)

Projet privé AIRCELLE - Groupe SAFRAN (programme EPICE), **co-responsable scientifique** de la conception et fabrication d'un prototype de machine à tisser automatique capable de réaliser les préformes carbonées, budget de 226 900 €, (01/01/2011 - 01/04/2014)

Projet privé RTD (Renault Truck Defence - Groupe VOLVO TRUCK)  
Étude bibliographique sur l'effet de souffle et les matériaux utilisés dans le domaine de l'anti-blast, **responsable scientifique** du projet, budget total de 47 500 € (01/10/2012 - 01/03/2013)

Projet privé RTD (Renault Truck Defence - Groupe VOLVO TRUCK)  
Étude sur la protection à l'explosif des véhicules blindés et sur la protection aux munitions 7.62x51mm AP WC (type AP8), **responsable scientifique** du projet, budget total de 39 900€ (01/02/2013 - 01/09/2013)

## 4. Responsabilités administratives et activités pédagogiques

### Responsabilités électives.

2005 – 2012 : **Membre élu** au Conseil d'Administration de l'ENSAIT, collège des enseignants-chercheurs

### Responsabilités administratives

2006 - 2008 : **Directeur** des relations extérieures à l'ENSAIT

Missions principales:

- mise en œuvre de la politique des stages des élèves ingénieurs (niveau L3 et M1 pour 150 étudiants/an)
- mise en œuvre de la politique des projets de fin d'études/ contrats recherche (niveau M2 pour 80 étudiants/an), objectif annuel de 450 000 €.

- Organisation de journées technologiques pour valoriser les travaux de recherche du laboratoire GEMTEX

- mise en œuvre d'une politique de valorisation de la recherche du GEMTEX

- mise en œuvre de la politique de formation continue de l'ENSAIT

2009 - 2010 : **Directeur** de la cellule de valorisation EUGENIE du laboratoire GEMTEX

Missions principales:

- poursuite des missions de directeur des relations extérieures à l'ENSAIT

- valorisation des compétences et activités de recherche du laboratoire GEMTEX, objectif annuel de 850 000 €.

- participation aux activités de recherche, volet valorisation et transfert, dans le cadre du PRES Lille Nord de France.

2000 - 2013: **Responsable** de l'atelier tissage (organisation des projets et cours/TD/TP et Formation continue, encadrement de technicien(s) et ingénieur(s))

1998 - 2008: **Membre** du Jury des oraux du concours ENSAIT en Tunisie (Entretien de motivation)

2009 - 2013: **Membre** du Jury des oraux du concours ENSAIT à Roubaix (Épreuve de Mécanique)

### Responsabilités Pédagogiques

1997 -2002 : **Responsable** des projets de deuxième année à l'ENSAIT (projet d'initiation à la recherche de 100H TD par groupe de 4 étudiants niveau Master 1)

### Activités Pédagogiques - Modules d'enseignement en formation initiale et en apprentissage

#### *Dispensés aux élèves ingénieurs ENSAIT*

1999 - 2014: Module Tissage (E1-TISS01, A1-TISS12) - niveau L3 - CM (4h00) - TP (3h00) - Crédits: 1,5 - Objectifs: Définition de l'ensemble des paramètres descriptifs d'un tissu et de la terminologie associée. Compréhension des différentes étapes de fabrication d'un tissu armuré: définir l'ensemble des paramètres descriptifs d'un tissu, modéliser un tissu de construction type : 1 chaîne 1 trame.

2001 - 2007: Module Fabrication des tissus Jacquards (code UC: A11\_41) - niveau M1 - CM (4h00) - TD (8h00) - TP (4h00) - Crédits: 1,5 - Objectifs :Acquérir une connaissance approfondie sur les tissus Jacquards et les aspects techniques de conception et de réalisation sur machine à tisser.

2007 - 2012: Module Tissage Textile Technique - Master TUT - niveau M2 - CM (8h00) - TD (6h00)- Crédits: 1,5 - Objectifs : Établir un cahier des charges fonctionnel et technique d'un matériau à base de tissé, connaître des principales techniques de caractérisation et de qualification des tissés, appréhender les contextes technico-économique des produits techniques.

2013 - 2014: Module Performances des textiles techniques (E3-TT15, A3-TT15) - niveau M2 - CM (8h00) - TD (6h00) - Crédits: 2 - Objectifs: définition d'un tissu à usage technique, applications des tissus à usage technique avec illustration des cahiers des charges produits, description des paramètres des fils influant sur les propriétés des tissus, démarche de conception d'un tissu à usage technique, adaptation du matériel de tissage pour les fils techniques verre, aramide et carbone, définition des structures multicouches tissées.

2000 - 2014: Tissage: Produits et propriétés - niveau M2+ - CM (3h00) - TP (3h00) - Objectif: Compréhension des propriétés de tissus et les moyens de fabrication

2009 - 2014: Matériaux d'isolation et protection (E2-TT01) - niveau M1 - CM (2h00) - Objectif: Présentation des applications de textiles de protection

2007 - 2014: Module Gestion de projet (E1-PROJ01, A2-PROJ01) - niveau L3 et M1 - CM (6h00) - TP (3h00) - Crédits : 0,5 - Objectifs : Aborder les notions de base de la définition d'un projet (objectif, finalité et enjeu), Hiérarchiser les tâches identifiées pour la réalisation du projet. Planifier les tâches dans une échelle de temps et d'espace.

#### *Dispensés aux élèves niveau licence et master*

2013 - 2014: Module Tissage Textile Technique - Master GSI - niveau M2 - CM (8h00) TD (2h00)- Crédits: 1,5 - Objectifs : Établir un cahier des charges fonctionnel et technique d'un matériau à base de tissé, connaître des principales techniques de caractérisation et de qualification des tissés, appréhender les contextes technico-économique des produits techniques.

2007 - 2013: Module Tissage - Master MCSIM - niveau M2+1 - CM (10h00) - TP (4h00) - Objectif: Notions de base de la technologie de tissage.

2005 - 2009: Module Weaving technology - M1 level - International Semester - CM (2h00) - TP (8h00) - Objective: Double weft fabric design and production on weaving looms.

2007 - 2014: Module Production and Performance of technical textiles- M1 level - International Semester - CM (3h00) - TP (6h00) - Objective: Technical textiles design and production.

2010 - 2013: Module Textile Composite structures for impact protection - Master E-team (2010 - University of Maribor - Slovenia) - (2011 - University of Manchester - UK) - (2013 - University of Gent - Belgium) - M2 level - CM(20h00) - Objective: Market review of protective textile applications (existing products worldwide), High performance yarns to use and description of the awaiting mechanical properties, Application to an existing ballistic fabric solution, Design of 3D fabric as warp interlock for ballistic protection, Design and computation of technical fabric, Applications to 3D warp interlock and optimization of ballistic fabric, Design and computation of technical fabric adapted to impact protection.

2007 - 2012: Tissage - HEFF Bruxelles - niveau L3 - CM (2h00) - TP (1h30) - Objectif: Initiation à la technologie de tissage et fabrication.

#### Formation continue

2013 - total: 8 heures - Oxyane

2012 - total: 24 heures - Dickson Constant - Protecop

2011 - total: 8 heures - Decathlon - Dickson Constant

2010 - total: 28 heures - Decathlon - Dickson Constant - Thuasnes - Hutchinson

2009 - total: 10 heures - Petronaphte - Okaidi

2008 - total: 54 heures - Okaidi, IFTH, Jacadi

2007 - total: 84 heures - Decathlon - IFTH - Okaidi - Dickson Constant

2006 - total: 88 heures - IFTH - Dickson Constant - Decathlon

2005 - total: 144 heures - IFTH - Chargeur - CREAT

2004 - total: 96 heures - IFTH

2003 - total: 96 heures - IFTH

2002 - total: 64 heures - IFTH

2001 - total: 120 heures - IFTH

2000 - total: 8 heures - Blanche Porte

#### Tutorat universitaire des 16 apprentis ingénieurs ENSAIT pendant la période 2000 - 2014

Prénom et Nom de l'apprenti ingénieur	Société	période
Marie GRANDJEAN	DAMART	2011_2014
Audrey MATEUS	HONEWELL FALL PROTECTION (SPERIAN)	2010_2013
Milène GELDOF	UIT Nord	2010_2013
Juliette RIVIERE	DOUBLET	2008_2011
Cécile CHAVANNE	FAURECIA	2007_2010
Xavier GAILLARD	SYSTEME U	2007_2010
Thomas LEROY	FILARTOIS	2006_2009
Corinne VERMEULEN	ANAIK	2006_2008
Laure CHABOCHE	FERLAM	2005_2008
Aurélien MERCIER	BIHR	2005_2008
Laurent VIVIEN	LE JACQUARD FRANCAIS	2005_2008
Thomas ROURE	CHOMARAT	2004_2007
Quynh Thy DUONG	COVITEX	2003_2006
Grégoire GHILBERT	INNOTEX	2003_2006
Lam Xé SAMSENESENA	HACOT COLOMBIER	2001_2004
Jerome NEU	LECLERC LEROUX	2000_2003

#### Liste détaillée des 49 projets de fin d'études (ingénieur/master) pendant la période 1998 - 2013

voir Annexe 1

## VI. Bibliographie

- [1] C. Nocito, "Développement d'un textile intégrant des cellules photovoltaïques pour application de protection solaire store enroulable," Université de Lille1, Villeneuve d'Ascq, France, Thèse de doctorat 03/11/2010.
- [2] J. Elferi, "Support médical avancé anti-escarre – approche système," Université de Lille 1, Villeneuve d'Ascq, France, Thèse de doctorat 18/11/2010.
- [3] S. Nauman, "Geometrical modelling and characterization of 3D warp interlock composites and their on-line structural health monitoring using flexible textile sensors," University of Lille 1, Lille, Ph-D thesis 24/03/2011.
- [4] C. Ha-Minh, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 17/11/2011.
- [5] M. Lefebvre, "Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules," Université de Valenciennes, Valenciennes, Thèse de doctorat 07/12/2011.
- [6] J. Van Roey, "Étude du comportement dynamique des matériaux granulaires et tissés: approche expérimentale et simulation numérique," Ecole Royale Militaire, Bruxelles, Belgique, Thèse de doctorat 16/12/2011.
- [7] B. Provost, "Étude et Réalisation d'une solution à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," Université de Valenciennes, Valenciennes, France, Thèse de doctorat 14/01/2013.



- [8] N. Trifigny, "Mesure in-situ et connaissance des phénomènes mécaniques au sein d'une structure tissée multicouches," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 09/12/2013.
- [9] J. Vilfayeau, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," Thèse de doctorat 13/03/2014.
- [10] C. Dufour, "Conception et optimisation des structures tissées interlocks pour optimisation de la mise en forme 3D des renforts fibreux de matériau composite," Université de Lille 1, Villeneuve d'ascq, France, Thèse de doctorat début de la thèse 01/09/2012.
- [11] C. Chevalier, "Détermination des caractéristiques dynamiques des structures fibreuses," Université de Valenciennes, Valenciennes, France, Thèse de doctorat en cours début 01/10/2012.
- [12] P. Lapeyronnie, "Mise en œuvre et comportement mécanique de composites organiques renforcés de structures 3D interlocks," Université de Lille 1, Douai, France, Thèse de doctorat 14/12/2010.
- [13] A. Kolopp, "Impact sur structures sandwichs pour applications de blindage aéronautique," Université de Toulouse, Toulouse, France, thèse de doctorat soutenue le 16/11/2012.
- [14] C. Florimond, "Contributions à la modélisation mécanique du comportement de mèches de renforts tissés à l'aide d'un schéma éléments finis implicite," Université de Lyon, Lyon, France, Thèse de doctorat 29/11/2013.
- [15] J. Louwagie and F. Boussu, "TRITEX: Transfer of research and innovations in textiles," *Unitex*, vol. 3, p. 51, 2009.

# Annexe 1. Liste détaillée des projets de fin d'études (ingénieur/master) pendant la période 1998 - 2013

## Année 1998 - 1 étudiant

Nuno DUARTE, Université de GUIMARES, Portugal, Réalisation de rubans armurés et d'échantillonnage jacquards, Projet de fin d'études ENSAIT, 1998.

## Année 1999 - 2 étudiants

Guillaume BAILLEUL, DUBAR WARNETON, France, Élaboration de matériaux composites à base de tissus métalliques, Projet de fin d'études ENSAIT, 1999.

Isabelle BERUJON, SIGIER CAPELLE, France, Gestion de production tresse, Projet de fin d'études ENSAIT, 1999.

## Année 2000 - 2 étudiants

Nathalie VOISIN, ULSTER CARPET, Irlande, Analyse des performances des métiers à tisser, Projet de fin d'études ENSAIT, 2000.

Lise DUFEU, LOUIS VUITTON, Paris, France, Optimisation des caractéristiques tissus - application bagages, Projet de fin d'études ENSAIT, 2000.

## Année 2001 - 2 étudiants

Ahmed DJEBBI, DICKSON CONSTANT, Wasquehal, France, Les origines du défaut de gaufrage sur toile de store, Projet de fin d'études ENSAIT, 2001.

Micheline JASARON, DUBAR WARNETON, France, Tissu Technique : Quel avenir pour les tissus à mémoire de forme, Projet de fin d'études ENSAIT, 2001

## Année 2002 - 1 étudiant

Boualem DRAOUI, ONERA, Lille, France, étude de matériaux composites à base d'un tissé en alliages à mémoire de forme - Tests d'amortissement, Projet de fin d'études ENSAIT, 2002.

## Année 2003 - 1 étudiant

Bruno EVERAERT, SAINT GOBAIN - VETROTEX, Mise au point d'un tissu technique moulable à base de Twintex, Projet de fin d'études ENSAIT, 2003.

## Année 2004 - 2 étudiants

Lam-Xé SAMSENESENA, FEUTRIE, Projet de fin d'études ENSAIT, 2004.

Stéphanie LECOMTE, MS COMPOSITES, Liévin, France, étude de matériaux composites à base de tricot et d'un tissu mixte alliage à mémoire de forme et Aramide, Projet de fin d'études ENSAIT, 2004.

## Année 2005 - 1 étudiant

Audrey FOUCAULT, BLANCHE PORTE, Tourcoing, France, Projet de fin d'études ENSAIT, 2005.

## Année 2006 - 4 étudiants

Virginie BEGUS, ENSAIT, Roubaix, France, Nouvelle solution textile pour composite anti-balistique, Master E-team 2006.

Wei RUAN, VICTOIRE ET COMPAGNIE, Tourcoing, France, Analyser et améliorer du suivi de production, Projet de fin d'études ENSAIT, 2006.

Quynh Thy DUONG, COVITEX, France, Identifier les paramètres qui président à la stratégie logistique et qualité des acteurs textiles afin d'amener les besoins client aux offres de Covitex, Projet de fin d'études ENSAIT, 2006.

Alvaro LECHUGA, TOYOTA MOTOR MANUFACTURING, Onnaing, France, Réduction des coûts de retour des emballages vides (small parts), Projet de fin d'études ENSAIT, 2006.

## Année 2007 - 5 étudiants

Aurélien SERRET, AIRBUS, Amélioration de la résistance au dépliage d'une cornière composite (Carbone/Epoxy), Projet de fin d'études ENSAIT, 2007.

Wei ZUO, POINTCARRE, Nantes, France, Adaptation d'un logiciel CAO textile au marché asiatique, Projet de fin d'études ENSAIT, 2007.

Sardette TAING, PROTECOP, France, Amélioration des performances d'un gilet discret contre les balles et coups de couteaux et diminution du trauma arrière, Projet de fin d'études ENSAIT, 2007.

Nathan LECLERC, THUASNES, France, Étude de faisabilité relative à l'intégration de capteurs électro-myographiques dans un complexe textile, Projet de fin d'études ENSAIT, 2007.

Benjamin DEGASNES, EMT, France, Réalisation d'un tissu intégrant un circuit électrique à vocation chauffante (intégrable dans un gant), Projet de fin d'études ENSAIT, 2007.

## Année 2008 - 6 étudiants

Christophe NOCITO, DICKSON CONSTANT, Wasquehal, France, Étude des matériaux pour l'intégration de cellules photovoltaïques sur les stores, Master MPT ENSAIT, 2008.

Saad NAUMAN, Laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, Modélisation Géométrique de tissu 3D Interlock, Master MPT ENSAIT, 2008.

Marie LEFEBVRE, ISL, Saint Louis, France, Structures 3D dans la lutte contre les IED, Projet de fin d'études ENSAIT, 2008.

Vivien LAURENT, LE JACQUARD FRANCAIS, Gerardmer, France, Gestion et réorganisation des flux de production : Traçabilité et suivi des encours, Projet de fin d'études ENSAIT, 2008.

Anaë SIGAUD, CONTREJOUR, France, Store à bandes verticales chauffant, Projet de fin d'études ENSAIT, 2008.

Jérôme MAILLET, OUVRY, Lyon, France, Développement d'une nouvelle solution balistique souple dans le cadre du projet EPIDARM, Projet de fin d'études ENSAIT, 2008.

Aurélien MERCIER, Société BIHR, Urmenil, France Étude sur la mise en place d'une filière de recyclage de ficelles agricoles usagées Projet de fin d'études ENSAIT, 2008.

Corinne VERMEULEN, ANAIK, Projet de fin d'études ENSAIT, 2008.

#### Année 2009 - 4 étudiants

Xi QIONG, AERONET, Glomel, France, Optimisation technico-économique des sangles à pontet de l'entreprise AERO NET, Projet de fin d'études ENSAIT, 2009.

Benjamin PROVOST, ISL, Saint Louis, France, Développement d'un tissu balistique contre les fragments à haute vitesse, Projet de fin d'études ENSAIT, 2009.

Florent LATOUCHE, PAYEN, Saint Julien en saint Alban, France, Caractérisation des étoffes hybrides, Projet de fin d'études ENSAIT, 2009.

Nassir NAWAB, laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, étude de moulabilité des tissus 3D multi-couches interlocks, Master MPT ENSAIT, 2009.

#### Année 2010 - 6 étudiants

Jérôme VILFAYAU, ISL, Saint Louis, France, Recherche d'une nouvelle solution composite textile pour la protection contre les fragments engendrés par un IED, Projet de fin d'études ENSAIT, 2010.

Adrienne LECAS, AIRCELLE - groupe SAFRAN, le Havre, France, Nouvelle technologie de structuration textile pour pièce aéronautique Projet de fin d'études ENSAIT, 2010.

Maxime GUILLOT, ONERA, Lille, France, Caractérisation mécanique dynamique de multi-filaments, Projet de fin d'études ENSAIT, 2010.

Xavier GAILLARD, SYSTEME U, France, Développement et mise au point d'une ligne de produit en accompagnement d'un chef de produit, Projet de fin d'études ENSAIT, 2010.

Wanessa GHERBOUDJ, FEDERAL MOGUL, Crépy-en-Valois, France, Mise en forme et pose d'un adhésif sur un textile en sortie du processus de tissage, Projet de fin d'études ENSAIT, 2010.

Cécile CHAVANNE, FAURECIA, Hénin Beaumont, France, Étude du budget logistique et ses répercussions sur le Plan Directeur Usine, Projet de fin d'études ENSAIT, 2010.

#### Année 2011 - 4 étudiants

Jonathan PARIENTE, laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, New 3D textile solution for anti-ballistic structures, Master MPT ENSAIT, 2011.

Julie CODINA, Groupe MARCK, Argenteuil, France, Développement d'une tenue pare-coups pour le maintien de l'ordre, Projet de fin d'études ENSAIT, 2011.

Matthieu BAUDOIN, ISL, Saint-Louis, France, Nouvelle solution composite textile pour la protection contre les fragments engendrés par un IED, Projet de fin d'études ENSAIT, 2011.

Ismael LAMSSEIH, TENCATE, Nijverdal, Netherland, Space debris protection materials, Projet de fin d'études ENSAIT, 2011.

#### Année 2012 - 3 étudiants

Clément DUFOUR, AIRCELLE - Groupe SAFRAN, Le Havre, France, Faisabilité de la préforme de rail de poutre RTM, Projet de fin d'études ENSAIT, 2012.

Caroline CHEVALIER, ISL, Saint-Louis, France, Étude de l'influence de paramètres intrinsèques à un tissu interlock sur ses propriétés balistiques, Projet de fin d'études ENSAIT, 2012.

Loïc RICHER, PRONAL, Leers, France, Compréhension des paramètres matériaux permettant de concevoir un réservoir, Projet de fin d'études ENSAIT, 2012.

#### Année 2013 - 5 étudiants

Mathilde BERTON, HEXCEL, Les Avenières, France, Suivi de l'installation d'un nouvel ourdissoir direct et amélioration de la qualité visuelle d'un tissu, Projet de fin d'études ENSAIT, 2013.

Pierre GRAND, HERAKLES - SAFRAN, Bordeaux, France, Étude de la tissabilité de fibres techniques lors du procédé de tissage, Projet de fin d'études ENSAIT, 2013.

Camille LORIN, Groupe CTT, Saint Hyacinthe, Canada, Tissage 3D : Intégration de lisières et développement de préformes spécifiques, Projet de fin d'études ENSAIT, 2013.

Nicolas CATRIENS, RTD, Satory, France, Développement d'une protection multi-matériaux à l'effet de souffle. Application aux véhicules blindés légers, Projet de fin d'études ENSAIT, 2013.

Pierre GARIN, RTD, Satory, France, Élaboration d'un blindage composite contre les menaces de type « Armour Piercing », Projet de fin d'études ENSAIT, 2013.

## Résumé

Les résultats et analyses, présentés dans les 5 principaux thèmes de ce rapport, s'articulent tous autour d'un même dénominateur commun que sont : les tissus 3D interlocks chaines.

Le premier thème se focalise sur l'observation et le paramétrage des tissus 3D interlocks chaines afin de définir le plus précisément les structures tissées réelles observées. Une définition des tissus 3D interlocks chaines ainsi qu'une classification des différents types d'architectures sont exposées. Différentes observations par le biais de vues en coupe des fils de chaîne et trame permettent de révéler la complexité de représentation des géométries des tissus 3D interlocks chaines ainsi que l'influence des paramètres du procédé de tissage sur les modifications de positionnement des fils dans la structure tissée multi-couches. Une classification des principales formes de section des fils de chaîne et trame d'un tissu 3D interlock chaîne est présentée afin d'optimiser la représentation globale de la structure tissée multi-couches. Enfin, l'influence du type de liage du tissu 3D interlock chaîne sur les propriétés mécaniques en mode de sollicitation quasi-statique est révélée à la fois sur des renforts résinés et non résinés.

Le deuxième thème tend à révéler les propriétés résiduelles des tissus 3D interlocks chaines en tant que renfort fibreux multidirectionnel pour des structures composites complexes. Par le biais d'une étude bibliographique complétée de nos résultats de recherche, nous avons mis en évidence les avantages et inconvénients du procédé de fabrication, de l'architecture tissée et des propriétés mécaniques des tissus 3D interlocks chaines. La résistance au délaminage ainsi que la résistance à l'impact semblent être les deux caractéristiques mécaniques principales des tissus 3D interlocks chaines. Sur la base de ces propriétés, nous avons montré la capacité de déformation par procédé de pliage et de mise en forme dans la direction de l'épaisseur, à vitesse quasi-statique, des tissus 3D interlocks chaines.

Le troisième thème est consacré à l'analyse du procédé de fabrication des tissus permettant d'en révéler son caractère complexe, nécessitant quelques adaptations. L'observation visuelle par images issues de vidéo rapides de la cinématique du procédé de tissage et la mesure des contraintes appliquées sur la matière par l'utilisation de fils capteurs innovants aboutissent à une meilleure compréhension de la fabrication des tissus. La cinématique du procédé de tissage a été reproduite par simulation, permettant d'analyser les différents mouvements dynamiques des éléments de la machine à tisser qui influent sur la géométrie finale de l'architecture tissée. L'observation des sections transverses des fils de chaîne et trame, ainsi que leur positionnement dans le tissu, montrent une forte similarité entre les tissus simulés et les tissus réels. L'optimisation du procédé de fabrication a permis de minimiser la dégradation des fils au cours du tissage. La conception de machines à tisser de prototypage adaptées aux tissus 3D interlocks chaines pour l'ensemble des types de fils (carbones et autres natures) repose sur cette expérience et compréhension du procédé de fabrication et a permis de l'optimiser aux structures tissées multi-couches.

Le quatrième thème s'oriente vers la présentation des solutions de protection souple à l'impact, notamment en définissant les modes de déformation dynamique des structures textiles. Un modèle numérique multi-échelles, macroscopique et mésoscopique, de tissu 2D a permis de simuler l'influence de différents paramètres de fils sur la performance balistique des structures tissées. Différents travaux de recherche expérimentaux d'impacts sur des tissus 3D interlock chaîne ont permis de révéler l'influence sur la performance balistique de certains paramètres du tissu; notamment l'homogénéité des valeurs de densité des fils de chaîne et trame, le nombre de couches du tissu 3D interlock chaîne et les titrages de fils de chaîne et trame. Sur la base de cette compréhension du modèle de comportement à l'impact des structures textiles souples, trois solutions différentes ont été proposées pour répondre aux besoins de protection des gilets pare-balles sous aux impacts de différentes munitions à des vitesses variées.

Le cinquième thème identifie les solutions de protection dure à l'impact, intégrant notamment des matériaux composites seuls ou couplés à d'autres matériaux de type métallique ou céramique. Par le biais d'une analyse bibliographique complétée de nos observations de recherche, nous avons mis en évidence les paramètres endogènes des tissus 3D interlocks chaines pouvant influencer sur le mode de comportement à l'impact. Sur la base de ces caractéristiques, nous avons identifié différentes solutions de protection dure, intégrant des matériaux composites, de renforts fibreux de type tissu 3D interlock chaîne de différentes architecture et composés de différents fils et résines, pour répondre aux impacts de diverses munitions à différentes vitesses. L'ensemble de ces travaux de recherche vise ainsi à mieux définir et comprendre les paramètres de produit et de procédé de fabrication des tissus 3D interlocks chaines.

## Mots clés :

Textile Composite, Protection souple, Composite pour blindage, Impact sur textile et composite, Procédé de tissage 3D, Tissu 3D interlock chaîne.

## Abstract

The results and analyzes, presented in these five main themes of this report, are all built around a common denominator, namely: 3D warp interlock fabrics.

The first theme focuses on the observation and parameterization of 3D warp interlock fabrics to define more precisely the observed woven structures. A definition of 3D warp interlock fabrics and a classification of different types of architectures are exposed. Different observations, through cross-sectional views of warp and weft yarns, can reveal the complexity of geometries representation of 3D warp interlock fabrics and the influence of process parameters on weaving positioning changes in the structure of multi-layered woven fabrics. A classification of the main cross-section shapes of warp and weft yarns, located inside a 3D warp interlock fabric, is presented in order to optimize the overall performance of multi-layer woven structure. Finally, the influence of the bonding type of 3D warp interlock fabric on the mechanical properties during quasi-static loading is proved both on dry and impregnated reinforcements.

The second theme tends to reveal the residual properties of 3D warp interlock fabrics as multi-fibre reinforcement for complex composite structures. Through a literature review completed with our search results, we highlighted the advantages and disadvantages of the manufacturing process, architecture woven and mechanical properties of 3D warp interlock fabrics. The delamination and the impact resistances appear to be the two main mechanical characteristics of the 3D warp interlock fabrics. Based on these properties, we have shown their ability to be deformed by bending process and dry forming at quasi-static speed.

The third theme focuses on the analysis of the manufacturing process of fabrics, allowing to reveal its complex nature and requiring some adjustments. Visual observation of images, obtained by high speed videos, of the kinematic of the weaving process and the measurement of stresses applied to the material by the use of innovative sensor yarns, helps to better understand the manufacture of fabrics. The kinematics of the weaving process have been reproduced by simulation, to analyse different dynamical movements of the loom parts which act on the actual geometry of the woven fabric. Observation of cross sections of warp and weft yarns and their positioning into the fabric, show high similarity between the simulated and actual fabrics. The optimization of the manufacturing process tends to minimize the yarn degradation during the weaving process. The design of weaving machines suitable for prototyping of 3D warp interlock fabric for all types of yarns (carbon and other types) is based on this experience and understanding of the manufacturing process and helped to optimize the multi-woven structures layers.

The fourth theme aims at identifying flexible impact protection solutions, defining the dynamic deformation modes of textile structures. A multi-scale, macroscopic and mesoscopic numerical model, 2D fabric was used to simulate the influence of different yarns parameters on the ballistic performance of woven structures. Various studies of experimental research of impacts on 3D warp interlock fabrics have revealed the influence on the ballistic performance of certain parameters of the fabric; especially the homogeneity of the warp and weft density values, the number of layers of the 3D warp interlock fabric and the warp and weft yarns yields. Based on this understanding of the behaviour model of the impact of flexible textile structures, three different solutions have been proposed to meet the protection needs of body armour under impact of various munitions at varying speeds.

The fifth subject identifies hard impact protection solutions, including integrating composites alone or coupled with other materials like metal or ceramics. Through a literature review completed with our research observations, we have identified endogenous fabric parameters of 3D warp interlock fabrics which can influence the impact behaviour. Based on these characteristics, we have found various hard protection solutions, integrating composite materials, fibre reinforcement type as 3D warp interlock fabrics with different architecture, yarns and resin impregnations, in response to the impacts of various different munitions speeds.

All of this research aims to better define and understand the product parameters and manufacturing process of 3D warp interlock fabrics.

## Key words :

Textile Composite, Soft protection, Composite for armouring, Impact on textile and composite, 3D weaving process, 3D warp interlock fabric.